ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

L. PASTOURIAUX
M. BELLIER
A. VAROQUAUX
A. GALICHON

ÉLECTRICITÉ PRATIQUE

COURS PROFESSIONNELS
POUR MONTEURS-ÉLECTRICIENS
LYCÉES TECHNIQUES
SECTIONS D'ÉLECTRICITÉ
DES COLLÈGES
D'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

LIBRAIRIE DELAGRAVE

A LA MÊME LIBRAIRIE

Leçons d'Électricité des Collèges d'enseignement technique,
par L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX. Deux volumes.

Technologie des monteurs-électriciens,
par A. VAROQUAUX et R. FRAYSSE.

Électricité industrielle. Quatre volumes.

I. ***Lois générales,*** par L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX.
II. ***Machines électriques,*** par M. BELLIER et A. GALICHON.
III. ***Électronique,*** par M. BELLIER et A. GALICHON.
IV. ***Mesures et Essais électriques,*** par L. PASTOURIAUX et A. VAROQUAUX.

Les Mathématiques aux Collèges d'enseignement technique.

1re année, par J.-P. ROBERT et A. FAUREL.
2e année, par J.-P. ROBERT et R. HENRION.
3e année, par R. HENRION et G. PLOMION.

Les Sciences dans les Collèges d'enseignement technique. Quatre volumes.

1re *année*, par V. RÉGNIER et J. LIGNON.
2e *année*, par J. LIGNON et R. CHAUVIÈRE.
3e *année* — ***Métallurgie-Mécanique-Électricité***, par J. LIGNON.
Deux volumes — ***Hygiène et vie pratique***, par R. CHAUVIÈRE.

AIDE-MÉMOIRE TECHNOR

Électricité appliquée, par P. HEINY.
Électronique appliquée, par M. BIBAL et P. HEINY.

173e Mille

L. PASTOURIAUX A. VAROQUAUX

ÉLECTRICITÉ PRATIQUE

à l'usage des Cours professionnels pour Monteurs-électriciens, et des Sections d'électricité des Collèges d'enseignement technique

ÉDITION REFONDUE

par

M. BELLIER
Agrégé des Sciences Physiques
Professeur d'électricité
au Conservatoire National
des Arts et Métiers

A. GALICHON
Professeur à l'École Nationale
d'Ingénieurs Arts et Métiers
de Paris

PARIS
LIBRAIRIE DELAGRAVE
1965

CERTIFICAT D'APTITUDE PROFESSIONNELLE POUR LA PROFESSION de MONTEUR-ÉLECTRICIEN

Extrait du programme fixé par l'Arrêté ministériel du 8 décembre 1948.

IV. ÉLECTROTECHNIQUE

1° Courant continu.

Energie.		
Quantité d'électricité.		
Courant électrique (intensité, tension). Mesure.	$I = Q : t.$	
Résistance électrique.	$R = \rho \frac{l}{s}.$	
Loi d'Ohm.	$U = RI.$	
Puissance électrique.	$P = UI = RI^2.$	
Loi de Joule.	$W = RI^2t.$	
Énergie électrique.	$W = UIt.$	
Quantité de chaleur.	$q = 0{,}24\,RI^2t.$	
Densité de courant.	$\delta = I : S.$	
Groupement des résistances en série.	$R = R_1 + R_2 + R_3 ..$	
Groupement des résistances en parallèle et mixte.	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \cdots$	
Courants dérivés.	$I = I_1 + I_2 ...$	
Générateurs (f. é. m., perte de charge, groupement).	$E = U + rI.$	
	$E = (R + r)\,I.$	
Récepteurs (f. c. é. m., perte de charge, groupement).	$E' = U - r'I.$	
Générateurs chimiques (piles et accumulateurs).		
Magnétisme. Aimants.	$\Phi = Hs$	(1).
Champs produits par les courants continus.	$H = 1{,}25 \frac{NI}{l}$	(1).
	$\Phi = 1{,}25\,N_1 I\,s$	(1).
Induction. Loi de Lenz.		
F. é. m. induite. Self-induction.	$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$	
Machines à courant continu. Dynamo, f. é. m.	$E = Nn\Phi$	(1).
Rendement électrique.	$\eta = U : E.$	
Rendement industriel.	$\eta' = P_u : P_t.$	
Moteurs à courant continu. Force contre-électromotrice.	$E' = Nn\Phi$	(1).
Rendement électrique.	$\eta = E' : U.$	
Rendement industriel.	$\eta' = P_u : P_t.$	

2° Courant alternatif.

Fréquence, période.	$T = \frac{1}{f}$.
Pulsation.	$\omega = 2\pi f$.
Intensité et tension (efficaces, maxim., instant.). Mesure.	
Notions sur le déphasage.	φ et $\cos\varphi$.
Self-induction.	
Capacité.	$C = \frac{Q}{U}$. $W = \frac{1}{2}CU^2$ (1).
Circuit parcouru par un courant alternatif.	
Relation entre U et I. Réactance de self.	$I = \frac{U}{L\omega}$.
Réactance de capacité.	$I = UC\omega$ (1).
Impédance.	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}}$.
Courant monophasé. Puissance apparente.	$P_a = UI$.
Puissance active.	$P = UI\cos\varphi$.
Puissance réactive.	$P_r = UI\sin\varphi$.
Courants diphasés. Tensions simple et composée.	$U = V\sqrt{2}$.
Puissance.	$P = UI\sqrt{2}\cos\varphi$.
Courants triphasés. Tensions simple et composée.	$U = V\sqrt{3}$ (étoile).
Intensité.	$I = J\sqrt{3}$ (triangle).
Puissance apparente.	$P_a = UI\sqrt{3}$.
Puissance active.	$P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$.
Puissance réactive.	$P_r = UI\sqrt{3}\sin\varphi$.
Notions sur l'équilibre des trois phases.	
Importance industrielle du cos φ, procédés pratiques d'amélioration.	
Alternateurs (monophasé, diphasé, triphasé).	
Fréquence.	$f = \frac{pN}{60}$.
Transformateurs. Rapport de transformation.	$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$.
Rendement.	$\eta = P_u : P_t$.
Moteurs à courants alternatifs. Synchrones, triphasés, monophasés, universels.	
Transformation des courants alternatifs en courant continu (groupe convertisseur, commutatrice, redresseur).	

Nota : Les formules marquées (1) seront données sans démonstration, on indiquera les unités à utiliser.

Avertissement.

Le présent ouvrage est le développement du programme d'électrotechnique du Certificat d'aptitude professionnelle de Monteur-électricien.

Ce programme, établi par des praticiens pour des praticiens, écarte toutes les questions d'électricité dont la connaissance n'est pas indispensable pour comprendre la description et le fonctionnement du matériel le plus usuel. Il équilibre excellemment les quatre grandes parties à étudier : lois du courant continu, machines à courant continu, lois du courant alternatif, machines à courant alternatif. C'est un plan d'étude élémentaire de l'électricité industrielle qui convient à la plupart des apprentis électriciens. Aussi nous permettons-nous de signaler notre nouveau manuel aux Professeurs des Collèges techniques et des sections spécialisées des Centres d'apprentissage.

Nous y avons introduit les nouvelles définitions légales des unités électriques et employé le vocabulaire, les notations et les symboles graphiques adoptés par l'UTE (Union Technique de l'Electricité).

Au niveau où nous nous sommes placés, l'enseignement de l'électricité ne peut être fructueux que s'il est expérimental. Le plus souvent, les expériences doivent précéder et préparer les énoncés des lois plutôt que de les suivre à titre de vérification. Nous avons souligné d'un filet noir, en marge du texte, celles qu'il est indispensable d'effectuer pendant la classe avec la participation des Elèves. Pour aider les Professeurs, une liste du matériel expérimental à utiliser commence chaque leçon et nous avons donné quelques renseignements pour fabriquer les appareils de démonstration les plus importants.

LES AUTEURS.

Lettres grecques employées dans les formules.

Figure.	*Nom.*	*Valeur.*	*Figure.*	*Nom.*	*Valeur.*
α,	alpha,	a.	λ,	lambda,	l.
β,	bêta,	b.	μ,	mu,	m.
γ,	gamma,	g.	Ω, ω,	oméga,	ô (long).
Δ,δ,	delta,	d.	π,	pi,	p.
η,	éta,	ê (long).	ρ,	rho,	r.
Φ, φ,	phi.	f.	Σ, σ,	sigma,	s.

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays, y compris l'U. R. S. S.

© *1963 by Librairie Delagrave.*

Ire PARTIE

COURANT CONTINU

I. PROPRIÉTÉS DU COURANT CONTINU

1re LEÇON

Les principaux effets du courant électrique. Sens d'un courant

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL [1]

Une batterie de trois éléments d'accumulateurs.
Fil de fer fin (d = 0,2 mm).
Boussole ou aiguille aimantée sur pivot.
Électro-aimant à noyau plongeur (voir 19e *leçon).*
Cuve en verre rectangulaire (par exemple, bac d'accumulateurs).
Deux plaques de cuivre (longueur et profondeur de la cuve, épaisseur 1 mm), *pliées dans le haut pour s'accrocher à deux tiges de verre mises sur la cuve, avec fils de cuivre soudés aux plaques.*
Un litre de solution de sulfate de cuivre (100 grammes *de sulfate,* 1 litre *d'eau).*
Fils laine, coton, caoutchouc.
Fil électrique avec ses enveloppes isolantes mises en évidence.
Interrupteurs divers (de sonnerie, de lampes, bipolaire à couteaux).
Commutateurs inverseurs divers
Voltmètre polarisé.

1. Nous ne mentionnerons pas, dans la liste du matériel nécessaire à chaque leçon, les fils de connexion dont il faut une provision abondante en morceaux de longueurs diverses.

Papier buvard blanc.
Solution de sel de cuisine dans l'eau, solution de ferrocyanure à 10 %.
Plaque de zinc (200 × 100 × 1 mm).
Deux tiges d'acier dans un manche isolant (voir 31e leçon).

LEÇON

Pour obtenir le courant électrique qui nous servira dans nos premières leçons, nous employons suivant le cas, soit un **élément** *d'accumulateur*, soit une *batterie*[1] *d'accumulateurs* de trois éléments.

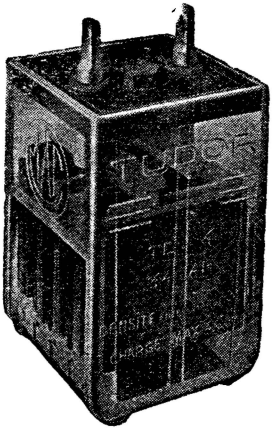


FIG. 1.
Élément d'accumulateur.

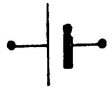


FIG. 2. — **Symbole graphique** représentant un élément d'accumulateur. Le trait long et fin figure la borne rouge, le trait gros et court, la borne noire. Les points noirs indiquent les attaches des fils.

Chaque élément consiste en un vase de verre, ou de matière isolante moulée, contenant un mélange d'eau et d'acide sulfurique dans lequel plongent des plaques de plomb (fig. 1 et 2). Nous étudierons plus tard comment fonctionne un tel appareil. Il nous suffit aujourd'hui de remarquer que son couvercle porte deux grosses bornes dont l'une est peinte en *rouge* et l'autre en *noir*.

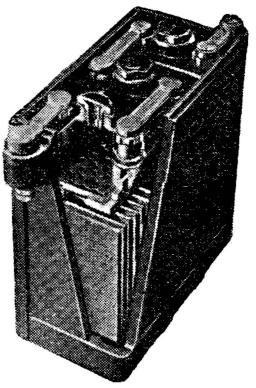


FIG. 3. — **Batterie transportable** de trois éléments d'accumulateurs. La cuve, en matière isolante moulée, est coupée en avant pour laisser voir les plaques du premier élément.

FIG. 4. — **Symbole** d'une batterie de trois éléments.

Dans une batterie d'accumulateurs, la borne rouge du premier élément est réunie par une barre de cuivre ou de plomb à la borne noire du second, la borne rouge du second à la borne noire du troisième.

1. Ici *batterie* a le sens du nom *ensemble* : une batterie d'accumulateurs est un ensemble d'éléments d'accumulateurs comme une batterie de cuisine est un ensemble d'ustensiles de cuisine.

On dit que les trois éléments sont montés **en série** et qu'ils forment une **batterie.** La batterie possède donc deux bornes libres : une noire et une rouge (fig. 3 et 4).

A. — Effets du courant électrique.

1. Expérience montrant trois propriétés du courant électrique.

Nous disposons des appareils suivants :

1° un fil fin de fer (*longueur :* 90 *mm*, *diamètre :* 0,2 *mm*) tendu entre deux bornes sur un socle de bois;

2° une cuve en verre contenant une dissolution dans l'eau de sulfate

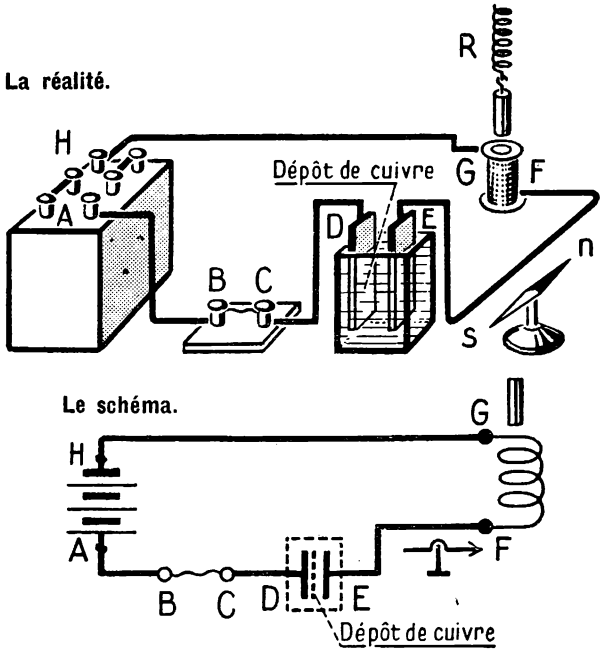


FIG. 5 et 6. — **Le courant électrique produit à la fois des effets calorifiques, chimiques et magnétiques.** 1. — Le fil de fer est chauffé au rouge, du cuivre se dépose sur la lame D, le pôle nord de l'aiguille aimantée dévie vers l'ouest, le noyau de fer est *avalé* par la bobine.

de cuivre[1], deux plaques de cuivre plongent dans le liquide, l'appareil se nomme un *voltamètre*;

3° une boussole ou une aiguille aimantée montée sur un pivot;

4° un électroaimant à noyau plongeur : c'est une bobine verticale de fil de cuivre dans laquelle pénètre l'extrémité inférieure d'un noyau de fer dont l'extrémité supérieure est attachée à un ressort à boudin.

Avec des fils de cuivre, nous réunissons la borne A de la batterie d'accumulateurs à la borne B du fil de fer, la borne C du fil à la borne D du voltamètre, la borne E à la borne F de l'électroaimant, la borne G à la borne H de la batterie. Le fil EF est tendu horizontalement au-dessus, dans la direction et près de l'aiguille aimantée (fig. 5 et 6).

Vous observez :

1° que **le fil de fer rougit,** montrant ainsi un dégagement de chaleur;

2° que **du cuivre se dépose sur l'une des plaques** du voltamètre tandis que l'autre plaque paraît se dissoudre dans le liquide[2]:

3° que **l'aiguille aimantée dévie** de la direction Nord-Sud et tend à se mettre en croix avec le fil qui la surmonte;

4° que **le noyau de l'électroaimant est attiré dans la bobine.**

Il se produit à la fois des **effets calorifiques,** des **effets chimiques,** des **effets magnétiques.**

On dit que dans les fils et les appareils passe un **courant électrique.**

Ce courant parcourt aussi l'accumulateur qui le produit :

un accumulateur est un **générateur** de courant.

B. Conducteurs. Isolants. Interrupteurs.

2. Certains corps sont conducteurs, d'autres sont isolants.

Les fils de cuivre employés dans l'expérience précédente peuvent être remplacés en totalité ou en partie par des fils d'aluminium, de fer ou de tout autre métal; les phénomènes constatés se produisent encore : **tous les métaux sont conducteurs** du courant électrique.

Mais si un fil de caoutchouc ou de coton est mis à la place d'un fil de cuivre, les phénomènes caractéristiques du courant cessent : le caoutchouc, le coton sont des **isolants.**

La laine, la soie, le papier, le bois, le soufre, le verre, la porcelaine, l'air, les gaz, l'eau pure, le pétrole, l'alcool, sont aussi des isolants.

Outre les métaux, citons parmi les conducteurs : le charbon, l'eau mélangée avec

1. Le sulfate de cuivre est fabriqué en dissolvant du cuivre dans de l'acide sulfurique chauffé. Il est vendu sous forme de gros cristaux bleus. Pour l'expérience indiquée, on en prépare une solution à environ 10 pour 100 à laquelle on ajoute 5 pour 100 d'acide sulfurique.

2. L'expérience doit durer plusieurs minutes pour que cet effet soit bien visible.

un acide ou dans laquelle on a dissous de la soude, des cristaux de sulfate de cuivre, de sel de cuisine, de carbonate de sodium.

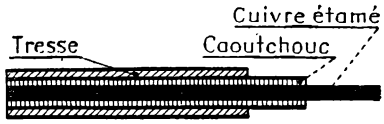


FIG. 7. — **Un conducteur électrique** comprend un fil de cuivre et une gaine isolante (caoutchouc et coton).

Les fils conducteurs employés dans les installations électriques sont entourés d'une gaine isolante pour éviter les pertes de courant s'ils touchent d'autres corps conducteurs (fig. 7).

3. Un circuit électrique est une suite ininterrompue de corps conducteurs parcourus par un courant d'électricité.

Examinons le montage effectué dans l'expérience du premier paragraphe.

Quand le courant passe, si vous suivez son trajet en partant de l'une des bornes de la batterie pour arriver à l'autre, à travers les appareils, vous ne rencontrez évidemment que des corps conducteurs. Pour revenir à la borne de départ à travers la batterie d'accumulateurs, vous ne trouvez aussi que des corps conducteurs : plomb, eau mélangée d'acide, barrettes de métal. Vous avez parcouru un **circuit électrique.**

C'est une chaîne fermée de conducteurs qui est parcourue par un courant électrique, comme un circuit hydraulique (*ex. refroidissement des moteurs*; *commande hydraulique de machines-outils*) est parcouru par un courant de liquide. Ce sont des particules extrêmement tenues d'**électricité** qui produisent le courant en se faufilant à travers la matière des conducteurs.

Le courant électrique est un courant d'électricité.

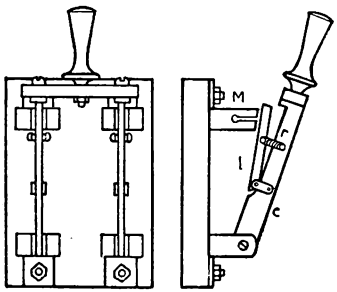


FIG. 8. — **Interrupteur bipolaire** industriel. Expliquez comment s'effectue la coupure brusque du courant.

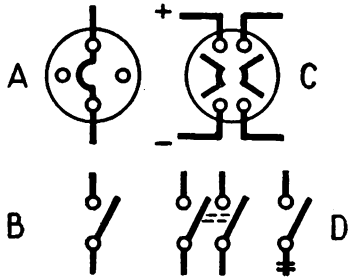


FIG. 9. — **Schémas d'interrupteurs.** A, interrupteur unipolaire rotatif; B, symbole d'un interrupteur unipolaire dans les plans d'installations électriques; C, interrupteur bipolaire rotatif; D, deux symboles d'interrupteur bipolaire

4. Les interrupteurs de courant.

Si l'on interrompt en un point quelconque la chaîne de conducteurs d'un circuit électrique, le courant ne passe plus : on dit que *le courant est coupé*, ou encore que *le circuit est ouvert.*

Il est commode de fermer ou d'ouvrir un circuit avec une petite barre métallique mobile, l'appareil se nomme un *interrupteur.* On réalise une *rupture brusque* du circuit pour diminuer la durée de la petite étincelle qui se produit lors de cette rupture et qui détériore les contacts (fig. 8 et 9).

C. — Sens d'un courant électrique.

5. Les deux bornes de la batterie d'accumulateurs ont des propriétés différentes.

Dans le montage de l'expérience du premier paragraphe, intervertissons les connexions des conducteurs aux bornes de la batterie (fig. 10).

Vous constatez que le fil de fer chauffe de la même façon, que la bobine de l'électroaimant avale encore le noyau, mais que, dans le vase à sulfate de cuivre, le dépôt de cuivre s'effectue sur l'autre lame, que le sens de déviation de l'aiguille aimantée est changé.

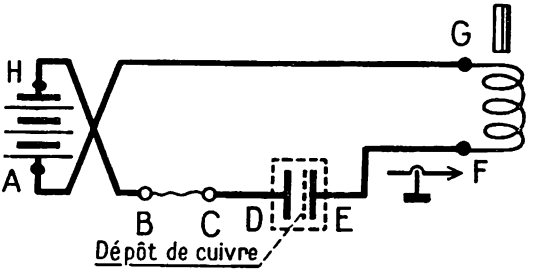


FIG. 10. — En intervertissant les conducteurs aux bornes de la batterie, le fil de fer continue à chauffer, la bobine à avaler son noyau. Le cuivre se dépose sur la lame E, le pôle nord de l'aiguille aimantée dévie vers l'est.

Les bornes de la batterie ont donc des propriétés différentes; c'est pourquoi on les a peintes de couleurs différentes.

La borne *rouge* reliée à la plaque de cuivre qui se dissout dans la solution de sulfate de cuivre quand le courant passe est nommée **borne positive** ou pôle + et la borne *noire*, **borne négative** ou pôle —.

La batterie d'accumulateurs est *polarisée* [1].

---

1. La décomposition du sulfate de cuivre, la déviation de l'aiguille aimantée par le courant sont des phénomènes *polarisés.* Le dégagement de chaleur, l'attraction du noyau de l'électroaimant sous l'action du courant ne sont pas polarisés.

6. Par convention, on attribue un sens à un courant électrique.

A l'extérieur du générateur le courant va de la borne positive à la borne négative (fig. 11).

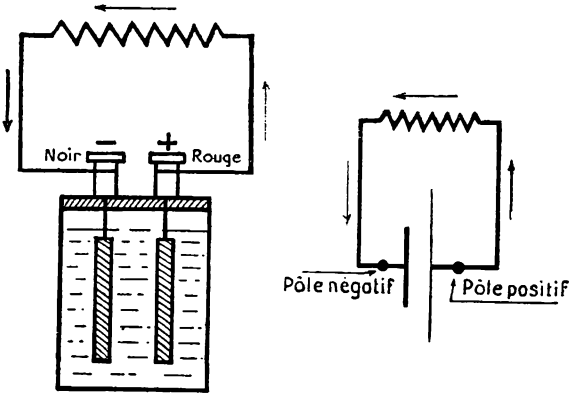


FIG. 11. — Par convention, le courant va du pôle positif au pôle négatif à l'extérieur du générateur.

A l'intérieur du générateur, le courant continue son trajet, il passe du pôle — au pôle +.

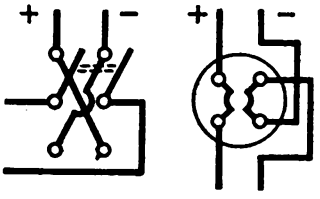


FIG. 12. — Schémas de **commutateurs inverseurs.** A droite, commutateur bipolaire rotatif; à gauche, commutateur bipolaire à couteaux.

On change commodément le sens du courant dans une portion de circuit ou un appareil avec un **commutateur** dont la figure 12 donne deux schémas.

7. Comment distinguer l'une de l'autre la borne positive et la borne négative d'une source de courant quand ces bornes ne portent aucune indication de repérage ?

On utilise soit les propriétés magnétiques, soit les propriétés chimiques du courant.

1° On branche sur la source de courant un **voltmètre polarisé.** C'est un instrument de mesure que nous étudierons dans une autre leçon, ses bornes sont marquées + et —, l'aiguille de l'appareil ne dévie sur l'échelle graduée que si l'on relie par des conducteurs les bornes de même nom de la source et du voltmètre.

2° Nous mélangeons une solution dans l'eau de chlorure de sodium (sel de cuisine) avec une solution de ferrocyanure de potassium [1]. Avec le liquide, nous imbibons une feuille de papier buvard blanc qui est ensuite égouttée.

La feuille humide est placée sur une plaque de zinc ou de cuivre et nous faisons glisser sur le papier deux pointes émoussées en fer connectées aux bornes de la batterie d'accumulateurs ou de la source de courant étudiée (fig. 13).

L'une des pointes trace sur le papier un **trait bleu,** le chemin suivi

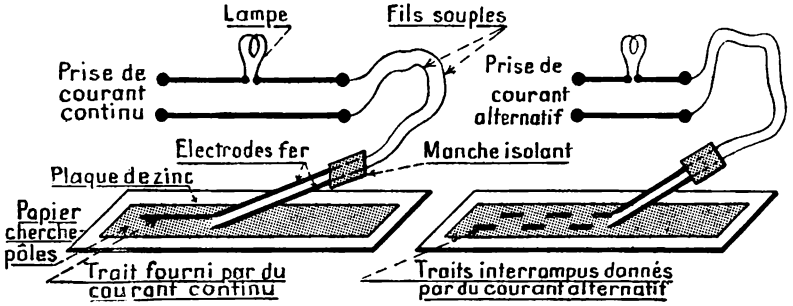


FIG. 13. — Expérience avec du **courant continu** à gauche, **du courant alternatif** à droite.

par l'autre pointe n'est pas colorée. *La pointe qui fournit un trait bleu est connectée à la borne positive de la source* [2].

8. La plupart des secteurs électriques distribuent du courant alternatif.

Proposons-nous de repérer, avec le papier cherche-pôle que nous avons fabriqué, la polarité des alvéoles de la prise de courant alimentée par le secteur.

Nous obtenons deux lignes de tirets bleus. Les tirets sont séparés par des intervalles non colorés (fig. 13). A un tiret d'une ligne correspond un intervalle de l'autre.

Donc chaque pointe est alternativement positive et négative. Si l'on avait déplacé les pointes de fer sur le papier pendant exactement une

1. C'est un sel dont les cristaux ressemblent à des morceaux de corne et que les forgerons emploient pour cémenter superficiellement le fer.

2. Le courant décompose le chlorure de sodium. Le chlore attaque l'une des pointes de fer et y produit du chlorure ferrique qui, avec le ferrocyanure, donne du bleu de Prusse.

seconde, en comptant le nombre de tirets d'une ligne on en trouverait 50. Le courant du secteur passe donc pendant une seconde 50 fois dans un sens et 50 fois en sens contraire. On le nomme **courant alternatif à 50 périodes par seconde.**

La prise de courant n'est pas polarisée.

Le courant fourni par la batterie d'accumulateurs a toujours le même sens : c'est **un courant continu.**

Les propriétés du courant continu sont plus simples que celles du courant alternatif, c'est pourquoi nous commencerons par étudier le courant continu.

D. — Appareils générateurs, appareils récepteurs.

9. Éléments d'une installation électrique.

Une installation électrique industrielle comprend :

1° Un ou plusieurs **générateurs.** Ce sont des machines puissantes rassemblées dans des usines spéciales nommées *centrales électriques.*

Les machines qui fournissent du courant continu sont des *dynamos* (fig. 14); celles qui donnent du courant alternatif des *alternateurs* (fig. 15). Certains de leurs organes tournent à grande vitesse; ils sont entraînés par des turbines à eau dans les *centrales hydroélectriques,* par des turbines à vapeur dans les *centrales thermiques*;

2° Des **lignes de distribution.** Ces lignes sont souvent aériennes et constituées par des câbles de cuivre ou d'aluminium suspendus à de grands pylônes par des isolateurs en porcelaine ou en verre. Dans les villes, les lignes sont plutôt souterraines, les conducteurs, groupés par deux ou par trois, sont séparés les uns des autres par du papier et du caoutchouc et logés dans un tuyau de plomb. Dans les bâtiments, les fils conducteurs, isolés sous caoutchouc et coton, sont abrités dans des tubes de carton recouverts de tôles de fer ou d'aluminium ou placés sous des moulures en bois;

3° Des **récepteurs** tels que des lampes, des appareils de chauffage, des moteurs plus ou moins gros, rarement des récepteurs électrochimiques;

4° Des **appareils de manœuvre,** notamment des interrupteurs qui commandent chaque récepteur ou groupe de récepteurs;

5° Des **appareils de mesure,** ils sont nombreux dans les centrales et chaque installation particulière possède au moins un *compteur électrique;*

6° Enfin des **appareils de sécurité,** comme les disjoncteurs et les fusibles.

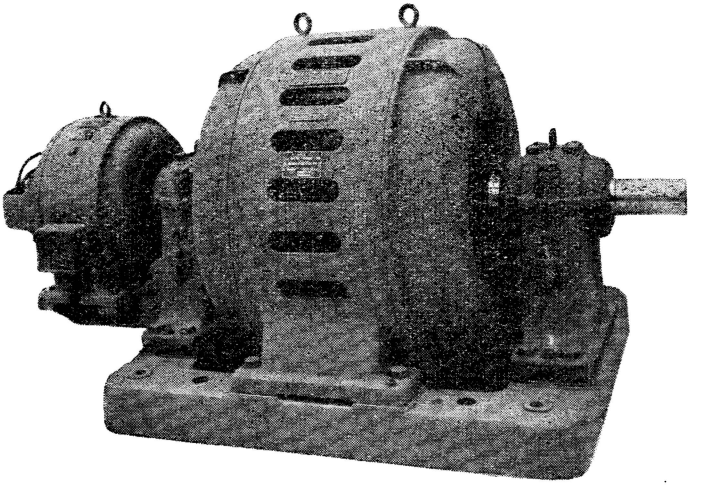


FIG. 15. — **Alternateur** de faible puissance. Le moteur qui le commande n'est pas représenté. La petite machine en bout d'arbre, à gauche, est une **dynamo** c'est l'excitatrice de l'alternateur.

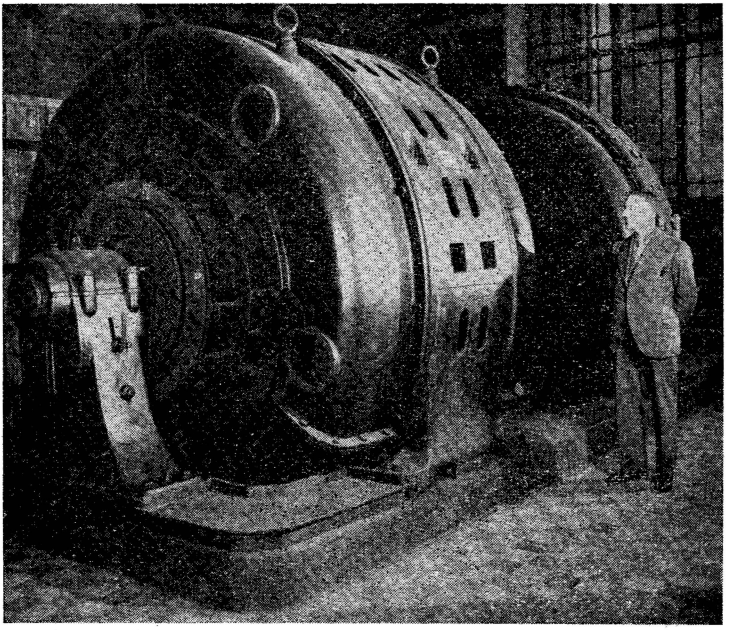


FIG. **14.** — Au premier plan a gauche, une **génératrice de courant continu ou dynamo** au second plan, à droite, le moteur qui l'entraîne.

RÉSUMÉ

1. — Le courant électrique produit :
des effets calorifiques,
des effets magnétiques,
des effets chimiques.

2. — Certains corps conduisent le courant : ils sont dits *bons conducteurs*, d'autres ne le conduisent pas : ce sont des *isolants*.
Une suite ininterrompue de conducteurs parcourus par le même courant constitue un circuit électrique.
Les interrupteurs servent à fermer ou à ouvrir un circuit électrique.

3. — Les effets chimiques et certains effets magnétiques montrent que les deux bornes du générateur ont des propriétés différentes. L'une de ces bornes est qualifiée *positive*, l'autre *négative*.
Il est convenu que le courant, dans la partie extérieure du circuit, va de la borne positive du générateur à la borne négative.

4. — Une distribution électrique comprend un ou des *générateurs*, des *récepteurs*, une *ligne de distribution*, des *appareils de manœuvre*, des *appareils de mesure* et des *appareils de sécurité*.

EXERCICES

1. Dessiner deux schémas électriques montrant le fonctionnement d'un commutateur inverseur à couteaux.
Recommencer les mêmes schémas avec un commutateur inverseur rotatif.

2. Pour repérer la polarité des deux fils d'une ligne à courant continu, on enfonce, à 1 ou 2 centimètres l'une de l'autre, les deux extrémités nues de ces fils dans la chair d'une pomme de terre crue coupée en deux : l'extrémité du fil négatif s'entoure d'une mousse abondante de petites bulles blanches.
a) Expliquer le fonctionnement de ce chercheur de pôles.
b) Peut-on, par une expérience analogue, distinguer une ligne à courant continu d'une ligne à courant alternatif?

N. B. Si l'on expérimente avec un branchement pris sur le secteur, il est indispensable, par mesure de sécurité, d'insérer une lampe à incandescence dans le circuit.

Intensité d'un courant. Ampère[1].

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de trois éléments.
Deux bobines rectangulaires (longueur 20 cm, *largeur* 15 cm), *de fil de cuivre de* 12/10 *isolé coton.*
Deux morceaux de 1 m *de fil de cuivre, un de* 2 *à* 5/10 *de millimètre.*
Deux morceaux de 2 *à* 3 m *de fil souple de* 9/10, *isolé.*
Une potence hauteur utile, 1 mètre.
Un rhéostat.

LEÇON

A. — Définition de l'ampère.

1. Deux courants parallèles s'attirent s'ils sont de même sens, se repoussent s'ils sont de sens contraires.

Voici deux bobines rectangulaires d'une vingtaine de spires chacune (fig. 1). Pour rendre très mobile le grand côté BC de la bobine 1, cette bobine est suspendue en A par l'un des fils longs et fins qui l'alimentent en courant; l'autre fil est laissé flottant pour ne pas gêner la rotation de la bobine.

Deux conducteurs relient ces fils aux bornes d'une batterie de trois éléments d'accumulateurs. Remarquez que le courant passe dans le même sens dans tous les brins formant un côté de la bobine, par exemple de B en C dans le côté vertical BC.

La bobine 2 est tenue à la main. Elle est connectée aussi à la batterie. Le courant va de D en E.

Approchons le côté DE de BC : **ils s'attirent;** or les courants ont le même sens et sont à peu près parallèles.

Retournons la bobine 2. Approchons ED de BC : les deux côtés se repoussent; les courants qui les parcourent sont de sens contraires.

1. On peut, sans inconvénient, supprimer cette leçon si on la juge trop difficile à comprendre au début du cours.

Nous avons montré qu'entre deux courants parallèles s'exerce une **force** que l'on qualifie d'**électrodynamique** et constaté que cette force est faible.

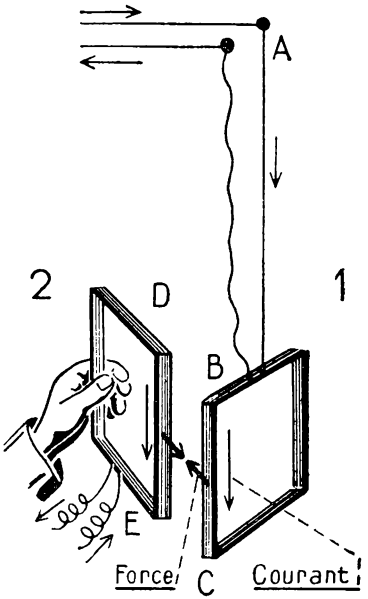


FIG. 1. — **Forces électrodynamiques.** Les courants sont parallèles et de même sens dans les brins BC et DE des bobines; la bobine 1 tourne et BC se rapproche de DE.

2. De quels facteurs dépend la force électrodynamique que deux courants parallèles exercent l'un sur l'autre?

L'un des conducteurs A est extrêmement long, l'autre B qui lui est parallèle a une longueur déterminée L (fig. 2). Vous savez que la force F exercée par A sur B est égale à la force exercée par B sur A, c'est la

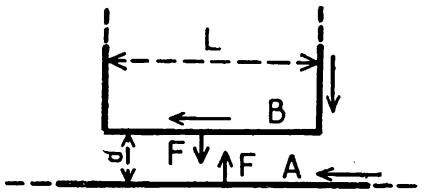


FIG. 2. — L'attraction entre les deux courants parallèles, de même sens, dont l'un A est extrêmement long, est proportionnelle à la longueur L du courant B et inversement proportionnelle à la distance d des deux courants.

loi de l'égalité de l'action et de la réaction que vous avez étudiée dans le cours de mécanique.

La force électrodynamique F dépend :
de la distance d des deux courants,
de la longueur L du courant B,
des courants eux-mêmes.

On peut la mesurer et aussi la calculer. Nous ne ferons ni cette mesure ni ce calcul, nous en indiquerons seulement les résultats.

a) Si la force d'attraction entre deux courants parallèles de même sens est F et que l'on inverse le sens de l'un d'eux, toute autre condition restant inchangée, la force de répulsion a la même valeur F.

b) Quand on fait varier la distance *d* entre les deux courants, la force électrodynamique varie : *elle est inversement proportionnelle à* d, c'est-à-dire qu'elle est double quand la distance est réduite à $\frac{d}{2}$, qu'elle est quatre fois plus petite quand la distance devient 4 *d*, etc...

c) Si l'on fait varier la longueur *L* du courant B sans rien changer d'autre dans le circuit, *la force* F *varie proportionnellement à* L.

d) En modifiant le circuit électrique auquel appartient la portion de courant B, par exemple en mettant plus ou moins d'éléments d'accumulateurs en circuit quand le générateur est une batterie, la valeur de la force F qui s'exerce entre les deux courants B et A est changée. Si elle est *plus grande*, on dit que le courant B est devenu **plus intense,** si elle est *plus faible*, le courant est **moins intense.**

L'action électrodynamique entre deux courants parallèles conduit donc à la notion d'**intensité d'un courant.**

3. L'intensité d'un courant est une grandeur mesurable.

Pour qu'elle soit mesurable, c'est-à-dire pour qu'on puisse l'exprimer par un nombre, on convient que *l'intensité d'un courant de longueur déterminée est proportionnelle à la force électrodynamique que ce courant exerce sur un autre courant invariable, extrêmement long, à une distance fixée.* La force électrodynamique étant mesurable, l'intensité du courant ou par abréviation normalisée **le courant,** l'est aussi.

Reste à choisir l'unité.

4. L'unité d'intensité de courant est l'ampère[1].

*L'***ampère** *est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de* 1 *mètre l'un de l'autre, dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à* 2 *dix-millionièmes de newton par mètre de longueur* (fig. 3).

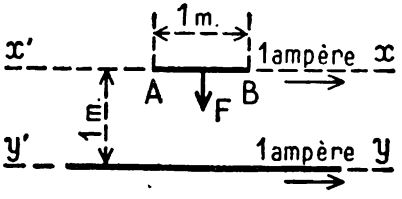


FIG. 3. — **Définition de l'ampère.** La force électrodynamique F qui s'exerce sur une longueur de 1 *mètre* de l'un des conducteurs est égale à 2 dix-millionièmes de *newton* lorsque les deux conducteurs sont distants de 1 *mètre* et que l'intensité du courant est 1 *ampère* dans chaque conducteur.

Une force égale à 2 dix-millionièmes de newton est très faible :

1. Nom choisi en hommage à Ampère, illustre savant français, qui vécut de 1775 à 1836.

environ 2/100 du poids de 1 milligramme. Pourtant l'ampère est une unité d'un ordre de grandeur usuel : l'intensité du courant dans une lampe à incandescence ordinaire est d'environ 0,5 *ampère;* dans un moteur de moyenne puissance, elle est de quelques dizaines d'*ampères*, dans un récepteur téléphonique, elle s'évalue en milliampères.

B. Électrodynamomètre-balance.

5. Un électrodynamomètre-balance permet, par une pesée, de mesurer avec une extrême précision l'intensité d'un courant en ampères.

Un électrodynamomètre-balance est, par exemple, composé de quatre bobines fixes B, C, B′, C′ et de deux bobines mobiles A et A′ suspendues aux plateaux d'une balance de précision (fig. 4).

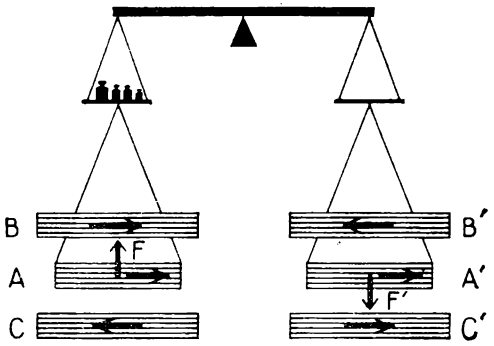


FIG. 4. — Schéma très simplifié d'un **électrodynamomètre-balance.** B, C, B′, C′, bobines fixes; A, A′, bobines mobiles suspendues aux plateaux d'une balance de précision. Le courant à mesurer passe dans toutes les bobines; les conducteurs qui amènent ces courants ne sont pas représentés. Les flèches horizontales indiquent le sens des courants. Les flèches verticales représentent les forces électrodynamiques qui agissent sur les bobines suspendues.

Le courant à mesurer I circule dans toutes ces bobines dans des sens tels que toutes les actions électrodynamiques entre bobines fixes et bobines mobiles tendent à incliner le fléau dans le même sens, vers la droite par exemple. On rétablit l'équilibre de la balance avec des masses marquées mises dans l'un des plateaux, soit 25,738 *grammes*, par exemple, le poids de ces masses.

Les bobines ont été construites avec grand soin ; la longueur du fil de chacune d'elles est connue aussi exactement que possible, la distance des bobines a été mesurée avec une grande précision. A l'aide de ces données et de la définition de l'ampère du paragraphe précédent, d'une part, du résultat de la pesée (25,738 *g*) d'autre part, on peut calculer l'intensité du courant qui passe dans l'appareil : soit, par exemple, 1,216 4 *ampère.*

Les électrodynamomètres-balances sont des appareils de construction difficile et très coûteuse, encombrants et non transportables. Ils sont réservés aux grands laboratoires nationaux de mesures. Ils servent à obtenir l'ampère légal dont il n'est pas possible de fabriquer un étalon matériel comme ceux du mètre ou du kilogramme.

On les emploie à vérifier des électrodynamomètres, plus simples et moins précis, qui suffisent dans les laboratoires industriels pour contrôler la graduation des appareils nommés **ampèremètres** que les électriciens emploient pour mesurer les intensités des courants.

RÉSUMÉ

1. — Un courant est plus ou moins intense selon qu'il attire plus ou moins fort un courant qui lui est parallèle.

2. — L'intensité d'un courant s'évalue en *ampères*. L'ampère est l'intensité d'un courant qui attire un courant parallèle identique, placé à 1 *mètre* de distance, avec une force d'environ 2/100 *milligramme-poids* par *mètre* de conducteur.

NOTES COMPLÉMENTAIRES

1. Définition de l'ampère. — Autrefois on définissait l'*ampère* en se référant à la décomposition par le courant de l'azotate d'argent (NO_3Ag) dissous dans l'eau. Cette décomposition s'effectue avec dépôt d'argent sur une plaque métallique connectée au pôle négatif du générateur de courant. La définition était le suivante : l'ampère est l'intensité du courant qui dépose par seconde 1,118 *milligramme* d'argent par décomposition d'une solution dans l'eau d'azotate d'argent.

Une mesure d'intensité d'après cette définition exigeait plusieurs minutes de passage du courant supposé invariable dans la solution à décomposer. Or il est difficile de maintenir une intensité rigoureusement constante pendant quelques minutes. En réalité on mesurait l'intensité moyenne pendant l'expérience et l'intensité à un instant déterminé n'était connue qu'avec une précision incertaine.

C'est pourquoi on a remplacé la définition *électrochimique* de l'ampère par une définition *électrodynamique*.

Cette définition paraît un peu compliquée. Vous comprenez qu'il fallait y préciser la longueur et la position l'un par rapport à l'autre des deux conducteurs parcourus par le courant égal à l'unité.

La force est exprimée en *newtons*. Le *newton* est la force qui agissant sur un corps dont la masse est 1 *kilogramme*, lui donne une accélération de 1 *mètre par seconde par seconde*. Vous savez que 1 *kilogramme-poids* donne à une masse de 1 *kilogramme* une accélération de 9,81 *mètres par seconde par seconde*. Pour donner à une masse de 1 *kilogramme* une accélération de 1 *mètre par seconde par seconde*, il suffit d'une force de 1 : 9,81 *kilogramme-poids*. C'est la valeur du *newton* en *kilogrammes-poids* : 0,102, soit environ 0,1.

Évaluée en *milligrammes-poids*, elle est $\frac{1\,000\,000}{9{,}81}$ *milligrammes-poids*. La force électrodynamique indiquée dans la définition de l'ampère vaut donc : $\left(2 \times \frac{1\,000\,000}{9{,}81}\right) : 10\,000\,000 = \frac{0{,}2}{9{,}81} \simeq \frac{2}{100}$ *milligramme-poids*.

2. Force électrodynamique s'exerçant entre deux courants parallèles. — En résumant par une formule le paragraphe 2 de la leçon, la force F qui s'exerce entre deux courants parallèles, l'un fort long, l'autre de longueur L, placés à une distance *d* l'un de l'autre, parcourus par des courants d'intensité I et I′ est :

$$F = k \frac{L\,I\,I'}{d}, \qquad (1)$$

k étant un coefficient qui dépend des unités employées.

Calculons le coefficient *k* quand on exprime :

F en *milligrammes-poids*,
d et L en *centimètres*,
I et I′ en *ampères*.

De (1) nous tirons :

$$k = \frac{F \times d}{L \cdot I \cdot I'}. \qquad (2)$$

Dans la *définition de l'ampère* F = 0,2 : 9,81 *mgp*, *d* = 100 *cm*, L = 100 *cm*, = I′ = 1*A*. Remplaçons les lettres par leurs valeurs dans l'expression (2) :

$$k = \frac{0{,}2 \times 100}{9{,}81 \times 100 \times 1 \times 1} = \frac{0{,}2}{9{,}81}$$

Donc la force électrodynamique entre deux courants parallèles est

$$F = \frac{0{,}2}{9{,}81} \frac{L \cdot I \cdot I'}{d},$$

en employant les unités ci-dessus indiquées.

3. Écriture abrégée des puissances de 10. Il est peu commode d'écrire, comme dans la note 1, des nombres formés du chiffre 1 suivi ou précédé de beaucoup de *zéros* et l'on risque de commettre des erreurs. On obtient une écriture plus claire, plus rapide et plus sûre en utilisant les deux procédés suivants :

1° un nombre tel que 10 000 000 s'écrit 10^7 (10 puissance 7), l'exposant indique le nombre de *zéros* qui suivent le 1 ;

2° un nombre tel que 0,000 1 s'écrit 10^{-4} (10 puissance moins 4), l'exposant indique le rang du chiffre 1 après la virgule.

Les deux procédés s'appliquent aussi à un groupe de chiffres significatifs suivi ou précédé de *zéros*. Par exemple, le nombre 20 700 000 s'écrit $20{,}7.10^6$, le nombre 0,000 008 4 s'écrit 84.10^{-7}.

4. Courant et intensité de courant. — Le vocabulaire électrotechnique conseille l'abréviation courant ; il prescrit l'usage du mot intensité s'il n'est pas suivi et complété par l'expression « de courant ».

Il y a ainsi symétrie de langage avec les tensions.

EXERCICES

1. Écrivez les nombres suivants :
mille milliards, 25 millions, 350 millionièmes, un dix-milliardième.

2. Écrivez à la manière ordinaire : 4.10^3; $9{,}81.10^7$; 5.10^{-5}; 2.10^{-10}.

3. Calculer la répulsion qui s'exerce entre deux conducteurs parallèles, longs de 50 *mètres*, distants de 30 *centimètres*, parcourus par des courants en sens contraires d'une intensité de 90 *ampères*.

Réponse : 27,5 *grammes.*

Mesure de l'intensité d'un courant : ampèremètres. Quantité d'électricité : ampèreheure.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de 3 éléments.
Trois ampèremètres, thermique, électromagnétique, à cadre mobile et aimant.
Trois ampèremètres gradués de 0 à 5 ampères.
Fil de fer (longueur 40 cm, *diamètre* 0,2 mm) *enroulé en boudin, monté entre deux bornes sur socle de bois.*
Fil de fer (longueur 60 cm, *diamètre* 0,2 mm) *enroulé comme le précédent.*
Compteur ampèreheuremètre.

N. B. — Des ampèremètres des modèles étudiés, hors service, sont très utiles pour montrer leurs organes intérieurs.

LEÇON

A. — Ampèremètres.

1. L'intensité d'un courant se mesure pratiquement avec des ampèremètres.

Dans la leçon précédente nous avons vu que l'intensité d'un courant s'évalue en *ampères* (symbole A), et indiqué comment, en appliquant seulement la définition de l'ampère, on mesure, pour des opérations d'étalonnage, l'intensité d'un courant en effectuant une pesée.

Dans la pratique quotidienne, on mesure un courant avec un **ampèremètre.**

Les *ampèremètres* sont des appareils portatifs, à lecture directe, c'est-à-dire qu'on lit l'intensité mesurée sur leur cadran comme on lit l'heure sur une horloge ou une montre. Ils fonctionnent en utilisant, soit les propriétés calorifiques, soit les propriétés magnétiques du courant.

2. Voici trois types d'ampèremètres usuels.

a) ***Ampèremètres thermiques.*** — Un fil fin de bronze, fixé à ses extrémités A et B (fig. 1), est traversé par la totalité, ou par une fraction connue, du courant à mesurer.

Un autre fil, très flexible, attaché en C, passe dans la gorge d'une petite poulie; il est tiré par un ressort *r*.

Le courant échauffe le fil AB qui s'allonge. Le fil flexible, tendu par

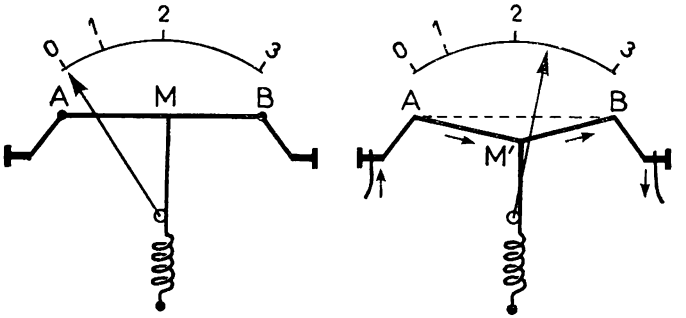


FIG. 1. — **Ampèremètre thermique.** A droite, le fil AB traversé par le courant s'est échauffé et par suite allongé; l'aiguille s'est déplacée devant l'échelle de l'appareil.

le ressort, amène le point C en C′, et, en même temps, fait tourner la poulie qui porte une aiguille indicatrice. L'allongement du fil chaud, d'autant plus grand que le courant est plus intense, se traduit donc par un déplacement de la pointe de l'aiguille devant le cadran gradué en ampères et fractions d'ampères.

Parce qu'ils sont fragiles, les ampèremètres thermiques sont moins employés que les autres.

b) ***Ampèremètres électromagnétiques.*** — On les nomme aussi *ampèremètres à fer doux.*

Le courant parcourt les spires (à gros fil) d'une bobine à l'intérieur de laquelle sont deux palettes de fer doux : l'une fixe F, l'autre mobile F′ parce que fixée à un axe tournant entre deux pivots. L'axe porte une aiguille qui se déplace devant un cadran. Un

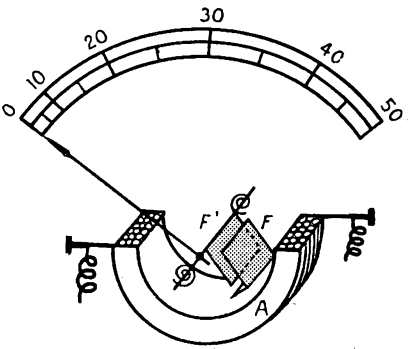


FIG. 2. — **Ampèremètre électromagnétique.** La bobine est supposée coupée par le milieu pour laisser voir les deux palettes de fer doux F et F′ qui se repoussent parce qu'elles s'aimantent quand le courant passe.

ou deux ressorts spiraux rappellent l'axe et l'aiguille vers leur position de départ (fig. 2).

Le courant qui passe dans la bobine aimante les palettes de la même façon : pôles nord en avant, par exemple, pôles sud à l'autre bout; elles se repoussent d'autant plus fort que le courant est plus intense. La palette mobile entraîne l'axe et l'aiguille dont la déviation est limitée par la torsion des spiraux; la position d'arrêt dépend donc de l'intensité du courant.

Le cadran est gradué en *ampères*.

c) ***Ampèremètres à cadre mobile et aimant.*** — Entre les pôles d'un aimant fixe circulaire est placée une petite bobine ou cadre, montée sur pivots (fig. 3). Deux ressorts spiraux amènent le courant au cadre; ils ont aussi pour rôle de tendre à ramener le cadre, quand il dévie, dans une position fixe dite de *zéro*. Une aiguille portée par le cadre et tournant avec lui se déplace devant une graduation.

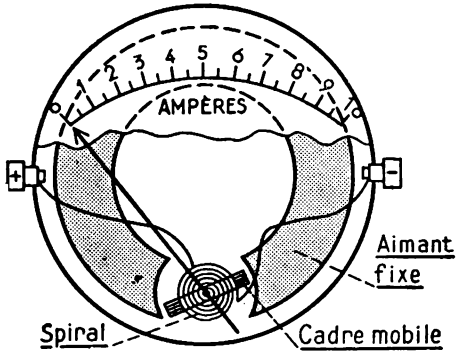


FIG. 3.
Ampèremètre à cadre mobile et aimant.

Vous savez qu'un courant dévie un aimant mobile. Inversement, un aimant fixe dévie un courant mobile et tend à le mettre en croix avec la droite joignant les pôles.

Quand la bobine de l'ampèremètre est parcourue par un courant elle tourne en entraînant l'aiguille. Son mouvement est limité par la torsion des spiraux. Sa pointe s'arrête au-dessus d'une division du cadran gradué, d'autant plus loin du zéro que le courant est plus intense.

La graduation est faite en ampères comme sur les appareils précédents.

3. Les ampèremètres à cadre mobile et aimant sont polarisés, les autres ne le sont pas.

Relions par des conducteurs un ampèremètre thermique, un ampèremètre électromagnétique, un ampèremètre à cadre mobile et aimant, de manière que le courant traverse successivement les trois appareils qui sont ainsi *montés en série* (fig. 4).

Faisons passer un courant dans l'ensemble, de sens convenable pour que les aiguilles des trois appareils dévient dans le sens de la graduation, en général de la gauche vers la droite.

Inversons le sens du courant. La déviation conserve le même sens pour les ampèremètres thermique et électromagnétique. L'aiguille de l'ampèremètre à cadre mobile et aimant fixe tend à dévier en sens opposé; elle en est empêchée par le boîtier de l'appareil.

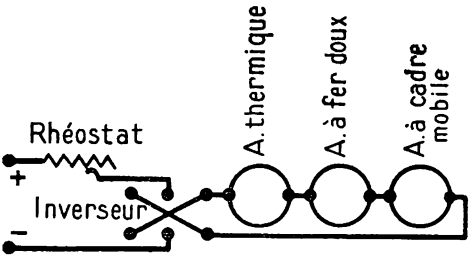


FIG. 4. — L'ampèremètre à cadre mobile est **polarisé**, les autres ne le sont pas.

L'ampèremètre à cadre mobile et aimant ne fonctionne donc que pour un sens déterminé du courant : il est **polarisé.** Ses deux bornes sont marquées l'une + et l'autre —.

Les ampèremètres thermiques et électromagnétiques ne sont pas polarisés.

4. Graduation d'un ampèremètre.

Elle est faite par comparaison avec un ampèremètre spécial de construction très soignée et en parfait état que l'on nomme un ampèremètre **étalon.**

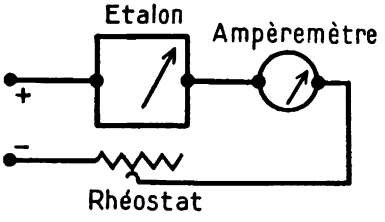


FIG. 5. — On **gradue** ou on **vérifie** un ampèremètre en le comparant à un ampèremètre étalon.

Dans un circuit électrique on dispose en série (fig. 5) :

un générateur,
un rhéostat qui sert à régler l'intensité du courant,
un ampèremètre étalon,
un (ou plusieurs) ampèremètre à graduer.

On règle le courant à 1 *ampère*, mesuré à l'ampèremètre étalon, on marque 1 en face de la pointe de l'aiguille de l'ampèremètre à graduer. De même pour les points principaux de la graduation.

Périodiquement, l'ampèremètre étalon est comparé à un électrodynamomètre. En somme, on peut considérer que tous les ampèremètres fabriqués sont comparés, en passant par un plus ou moins grand nombre

d'intermédiaires, aux électrodynamomètres-balances des grands laboratoires.

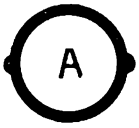


FIG. 6. **Symbole d'un ampèremètre** dans les schémas d'installations électriques.

Les ampèremètres, en vieillissant, diminuent peu à peu d'exactitude : les aimants s'affaiblissent, l'élasticité des spiraux change, la structure des fils chauds se modifie. On les compare de temps en temps à un ampèremètre étalon. L'opération, dite *étalonnage*, a pour but de dresser un tableau de l'intensité qu'indique l'étalon pour chacune des principales graduations de l'échelle de l'appareil vérifié. Ce tableau sert à corriger les lectures brutes faites sur l'appareil dans les mesures où l'on cherche une grande exactitude.

Dans les schémas d'installations électriques, les ampèremètres sont représentés par le symbole de la figure 6.

B. — Propriété importante de l'intensité d'un courant.

5. Le courant a la même valeur en tous les points d'un circuit sans bifurcations.

Nous montons comme l'indique la figure 7 :

une batterie de trois éléments d'accumulateurs,

deux ampèremètres gradués de 0 à 5 ampères,

un récepteur consistant en un fil de fer long de 0,40 *mètre*, de diamètre 0,2 *millimètre* enroulé en boudin et monté entre deux bornes.

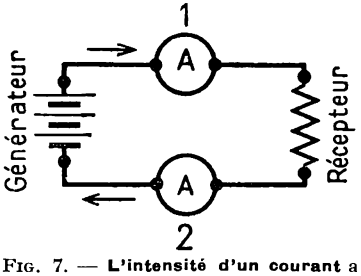


FIG. 7. — **L'intensité d'un courant** a la même valeur en **1**, **avant**, et en **2**, **après** le récepteur.

Le courant traverse d'abord l'ampèremètre 1, puis le récepteur, ensuite l'ampèremètre 2.

Les deux ampèremètres donnent la même indication, soit 2,4 *ampères*.

Donc **le courant a la même valeur en tous les points d'un circuit sans bifurcations.**

Cette loi est importante :

a) elle montre qu'**un récepteur ne consomme pas l'électricité qui le traverse;** de même une roue ou une turbine hydraulique installée sur un

cours d'eau n'use pas une partie de l'eau qui lui est fournie et le **débit** du cours d'eau est le même en *amont* et en *aval* de la machine;

b) il en résulte que, pour mesurer l'intensité du courant **l'ampèremètre peut être placé en un point quelconque du circuit.**

6. Quand un courant se partage dans plusieurs bifurcations, le courant total est la somme des courants dérivés.

En plus du matériel de l'expérience précédente, nous utilisons un second récepteur calorifique (fil de fer, $l = 0{,}60$ *m*, $d = 0{,}2$ *mm*) et un troisième ampéremètre.

Les appareils sont montés comme l'indique la figure 8.

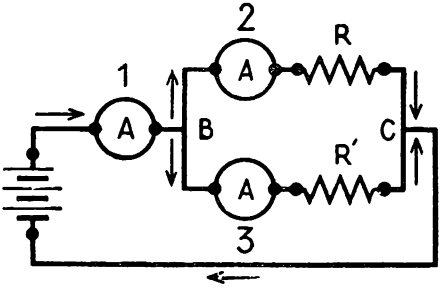


FIG. 8. — **Le courant total est la somme des courants dérivés.**

Le courant venant de la borne + du générateur traverse l'ampèremètre **1**, puis se partage en B : une partie passe dans l'ampèremètre **2** et le récepteur R, une autre partie dans l'ampèremètre **3** et le récepteur R′; puis, en C, les deux courants se réunissent et reviennent par le même conducteur à la borne — du générateur.

L'ampèremètre **1** indique 4,4 *ampères*, c'est l'intensité du **courant total.** L'ampèremètre **2** marque 2,4 *ampères*, l'ampèremètre **3,** 2 *ampères.*

Vous constatez que **le courant total est la somme des courants dérivés.** Cette loi est valable quel que soit le nombre des dérivations.

C. — Quantité d'électricité : ampère-heure.

7. En un temps déterminé un courant transporte une certaine quantité d'électricité.

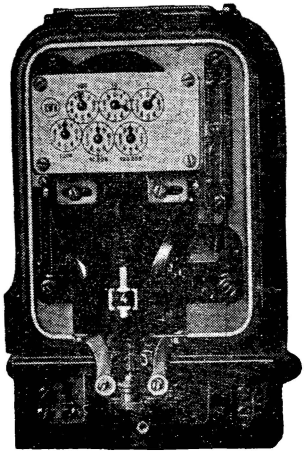
Un courant électrique est comparable à un courant d'eau : c'est un courant d'électricité.

On précise l'importance d'un courant d'eau en indiquant son **débit,** c'est-à-dire le volume d'eau qu'il transporte en une seconde, par exemple 3 *litres par seconde.*

En un nombre de secondes déterminé, soit 500 *secondes*, le courant d'eau fournit une **quantité d'eau** que l'on calcule en faisant le produit du débit par le temps en secondes de l'écoulement :

$$3 \times 500 = 1\,500 \textit{ litres.}$$

L'intensité d'un courant électrique correspond au débit d'un courant



Cliché Cie des Compteurs.

FIG. 9. — Un **compteur ampère heuremètre** sert à mesurer les quantités d'électricité.

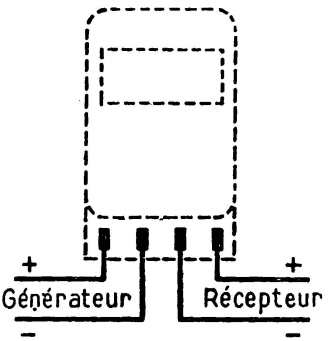


FIG. 10. — **Schéma de branchement** d'un compteur ampèreheuremètre.

d'eau. Un courant électrique transporte en un temps déterminé une certaine **quantité d'électricité.**

a) L'unité industrielle de quantité d'électricité est l'**ampère-heure** (*Ah*).

1 *ampère-heure est la quantité d'électricité transportée en une heure par un courant invariable de* 1 *ampère.*

En 2, 3,...10 *heures*, un courant de 1 *ampère* transporte 2, 3, ...10 *ampères-heures*. Un courant de 2, 3 ...6 *ampères* fournit en 1 *heure* 2, 3... 6 *ampères-heures*. Un courant de 8 *ampères* fournit en 5 *heures* 8 × 5 = 40 *ampères-heures*.

D'une façon générale :

$$\underset{Ah}{Q} = \underset{A}{I} \times \underset{h}{t}$$

b) Dans 1 *heure*, il y a 3 600 *secondes*. En 1 *seconde*, un courant de 1 *ampère* transporte 1 : 3 600 *ampère-heure*. A cette quantité, qui est 1 *ampère-seconde*, on donne le nom de **coulomb** [1].

8. Mesure d'une quantité d'électricité.

a) A condition que le courant reste le même pendant la durée de la mesure, on peut mesurer I avec un *ampèremètre* et t avec un *chronomètre* et effectuer le produit $I \times t$.

b) Il est plus commode de se servir d'un *compteur* dit **ampèreheuremètre** (fig. 9). C'est un petit moteur électrique très léger dont chaque tour de l'axe vertical correspond au passage dans l'instrument de la même quantité d'électricité, par exemple 0,000 5 *ampère-heure*. Un train de petites roues dentées enregistre le nombre de tours faits par le moteur pendant une mesure.

La figure 10 est le schéma de branchement d'un compteur ampèreheuremètre.

RÉSUMÉ

1. — On mesure l'intensité d'un courant avec un *ampèremètre*. Il existe des ampèremètres à cadre mobile et aimant, des ampèremètres thermiques et des ampèremètres électromagnétiques.

2. — Un courant électrique a la même valeur en tous les points d'un circuit électrique sans bifurcations.
Dans un circuit qui se bifurque en plusieurs branches, l'intensité du courant total est la somme des intensités des courants dérivés.

3. — Un *ampère-heure* est la quantité d'électricité transportée en 1 *heure* par un courant de 1 *ampère*
Un courant de I *ampères* fournit en t *heures*

$$Q_{Ah} = I_A \times t_h$$

Un *coulomb* est la quantité d'électricité fournie en 1 *seconde* par un courant de 1 *ampère*.
Un *ampère-heure* vaut 3 600 *coulombs*.

4. — On mesure les quantités d'électricité avec des compteurs dits ampèreheuremètres.

---

1. En mémoire de Coulomb, ingénieur et physicien français (1736-1806).

EXERCICES

1. Une ligne électrique *bifilaire* (à deux fils) alimente 16 lampes à incandescence qui sont montés *en dérivation* entre les deux fils de ligne, comme l'indique la figure 11.

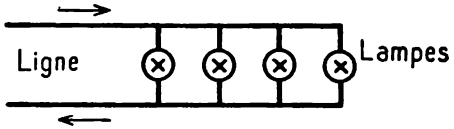


FIG. 11. — Lampes montées en **dérivation** sur une ligne de distribution.

Dix de ces lampes absorbent chacune 0,52 *ampère*, les 6 autres chacune 0,87 *ampère*. Quelle est l'intensité du courant total dans la ligne?

Réponse : 10,4 *ampères.*

2. Dans les expressions « une lampe ordinaire *absorbe* 0,5 *ampère* », « un radiateur électrique *consomme* 12 *ampères* », les mots *absorbe*, *consomme* sont-ils employés avec leur sens habituel? Précisez leur signification.

3. Un courant de 12 *ampères* passe dans un circuit pendant 2 *heures* 30 *minutes*. Calculer la quantité d'électricité débitée : 1° en ampères-heures; 2° en coulombs.

Réponses : 30 *A h ou* 108 000 *coulombs.*

4. Une batterie d'accumulateurs a une *capacité* de 90 *ampères-heures*, c'est-à-dire qu'elle peut fournir une quantité d'électricité égale à 90 *ampères-heures*. Elle débite un courant constant de 8 *ampères* pendant 5 *heures* 15 *minutes*. Pendant combien de temps pourra-t-elle fournir *encore* un courant de 8 *ampères?*

Réponse : 6 *heures.*

Résistance électrique. Ohm.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie de 3 éléments d'accumulateurs.
Un ampèremètre 0-5 ampères, gradué en dixièmes d'ampères.
Un interrupteur.
Une collection de fils résistants de nature et dimensions connues, soit :
un fil de ferro-nickel, longueur 0,30 m, *diamètre* : 0,2 mm,
un fil de — — 2 m, — 1 mm,
un fil de fer, — 3 m, — 0,5 mm,
un fil de maillechort, — 4 m, — 1 mm.
Une collection de résistances marquées, savoir :
0,1 Ω — 2 de 0,2 Ω — 0,5 Ω — 1 Ω pouvant supporter 6 A,
2 de 2 Ω — 5 Ω — 10 Ω — — 1,5 A.
Un rhéostat à plots.
Un rhéostat à curseur.

LEÇON

Nous montons en série dans le même circuit : une batterie d'accumulateurs, un ampèremètre, un fil conducteur entre les bornes B et C, un interrupteur (fig. 1). Les connexions sont faites avec de gros fils de cuivre à gaine isolante.

A. — Notion de résistance électrique.

1. En général, l'intensité du courant change quand on place dans le circuit des fils conducteurs différents.

Mettons successivement différents fils conducteurs entre les bornes B et C *sans rien changer au reste du circuit.* Nous lisons sur l'ampèremètre les courants suivants :

fil de ferro-nickel ($l = 0{,}30$ *m*, $d = 0{,}2$ *mm*)..... 0,8 *ampère*,
— ferro-nickel ($l = 2$ *m*, $d = 1$ *mm*)..... 3 *ampères*,
— fer ($l = 3$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm*)..... 2,5 *ampères*,
— maillechort ($l = 4$ *m*, $d = 1$ *mm*)..... 3,4 *ampères*.

Le courant est différent d'un fil à l'autre, ce qui montre que les fils opposent à l'électricité en mouvement une résistance qui n'est pas la même pour tous.

Cette résistance au passage du courant est analogue à un frottement mécanique. Elle se traduit, comme lui, par un **échauffement** que nous étudierons dans la 12e leçon.

B. — Mesure de la résistance d'un conducteur.

2. La résistance électrique d'un conducteur est une grandeur mesurable.

En effet, on peut définir l'*égalité* et *la somme de plusieurs résistances.*

1° Voici trois fils de longueurs et de sections différentes, l'un de fer, un autre de ferro-nickel et le troisième de maillechort. Plaçons-les successivement entre les bornes B et C (fig. 1), autrement dit substituons-les l'un à l'autre dans le même circuit. Si l'intensité du courant est la même dans les trois cas, on dit que **les résistances des trois fils sont égales.**

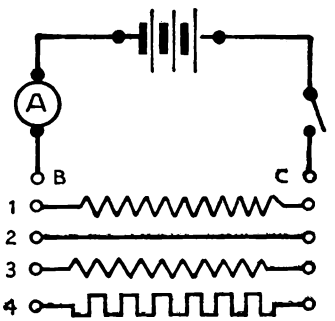


FIG. 1. — En montant successivement des conducteurs différents entre les bornes B et C, les intensités du courant dans le circuit sont, en général, différentes. On dit que les conducteurs ont des **résistances différentes.**

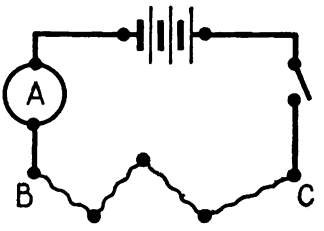


FIG. 2. — Quand on ajoute des conducteurs résistants entre B et C, le courant diminue, donc la résistance entre B et C augmente. **La résistance totale est la somme des résistances partielles en série.**

2° Plaçons entre les bornes B et C du circuit plusieurs fils que nous connectons bout à bout (en série) (fig. 2). Nous constatons que :

a) le courant diminue chaque fois que nous ajoutons un fil à l'ensemble; autrement dit, la résistance entre les points B et C augmente quand on accroît la série des conducteurs;

b) que le courant reste le même si nous intervertissons de façon quelconque l'ordre des fils.

Ces deux observations confirment l'idée que nous avons de la résistance, elles justifient la convention suivante : **la résistance de l'ensemble de plusieurs conducteurs montés en série est la somme des résistances de chacun des conducteurs.**

3. L'unité de résistance électrique est l'ohm.

L'ohm est représenté par la résistance d'une colonne de mercure, de section uniforme, prise à la température de 0°, *ayant une longueur de*

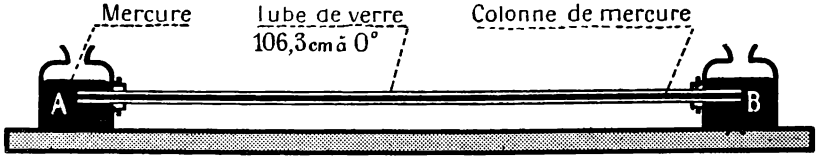


FIG. 3. — **Étalon de l'ohm.** C'est un fil de mercure de section constante, long de **106,3** *cm* à 0° et pesant **14,452** *g*.

106,300 *centimètres, et une masse de* 14,452 1 *grammes* (*fig.* 3)[1].

Son symbole est Ω (oméga).

Les constructeurs d'appareils de mesures électriques fabriquent des *étalons secondaires* constitués par des fils de manganine[2] dont la résistance est égale à celle de l'étalon en mercure mais qui n'en ont pas la fragilité.

4. On réalise des séries de résistances marquées pour servir à la mesure des résistances, comme on constitue des séries de masses étalonnées pour les pesées.

On détermine par tâtonnements la longueur d'un fil de manganine dont le diamètre est uniforme pour que sa résistance soit égale à celle d'un ohm étalonné, soit *l mètres* cette longueur, par exemple

$$l = 1{,}87 \text{ mètre.}$$

1. La définition légale de l'ohm est donnée dans la 14e leçon.
2. La manganine est un alliage de cuivre, de manganèse et de nickel. Sa résistance électrique ne varie pratiquement pas avec la température.

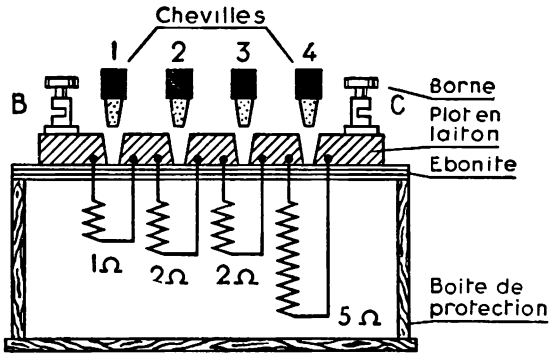


FIG. 4. — Schéma d'une **boîte de résistances étalonnées.** Cette boîte permet d'obtenir facilement une résistance de 1, 2, 3... 10 *ohms*. Elle ne peut supporter que des intensités faibles, (0,5 *A*), c'est un appareil de laboratoire.

1° En prenant des longueurs du même fil l, $2l$, $2l$, $5l$, on obtient des résistances de 1, 2, 2, 5 *ohms*.

On fabrique de la même façon des résistances de 10, 20, 20, 50 *ohms*.

2° En utilisant des fils de $0{,}1l$, $0{,}2l$, $0{,}2l$, $0{,}5l$ on réalise des résistances de 0,1, 0,2, 0,2, 0,5 *ohm*.

Ces résistances prises isolément ou groupées plusieurs en série fournissent toutes les résistances étalonnées d'un nombre entier de dixièmes d'ohm comprises entre 0,1 et 111 *ohms*.

La figure 4 représente le schéma d'une boîte de résistances étalonnées que l'on utilise dans les laboratoires. Vous remarquerez la facilité du couplage en série de ces résistances.

5. La résistance électrique d'un conducteur peut être mesurée par substitution.

Nous disposons le conducteur de résistance inconnue entre les bornes B et C du montage indiqué par la figure 5; nous lisons sur l'ampèremètre l'intensité du courant dans le circuit, soit 0,75 *ampère*.

Nous remplaçons le conducteur par une résistance que nous formons avec les résistances marquées pour obtenir la même intensité, 0,75 *ampère*. Cette résistance, soit 8 *ohms*, est égale à la résistance du conducteur essayé.

Ce procédé de mesure par substitution est peu employé; nous l'avons indiqué parce qu'il

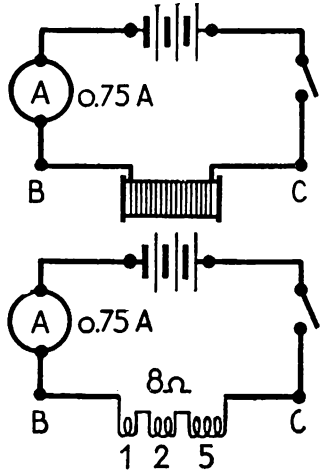


FIG. 5. — **Mesure d'une résistance par la méthode de substitution.** La résistance marquée 8 *ohms* remplace dans le circuit la résistance à mesurer sans que l'intensité change. La résistance à mesurer vaut donc 8 *ohms*.

résulte logiquement des paragraphes qui précèdent. D'autres procédés de mesure, moins simples mais plus commodes, sont utilisés. Nous étudierons le plus usité dans une prochaine leçon.

C. — Applications.

6. La résistance électrique d'un conducteur varie, en général, avec la température.

Enroulons une vingtaine de mètres de fil de cuivre de 0,5 *millimètre* de diamètre isolé au coton en un toron que nous plaçons dans un vase renfermant de l'huile. Il est possible de chauffer cette huile, de préférence au bain-marie (fig. 6). Les extrémités du fil sont connectées aux bornes d'une batterie d'accumulateurs avec un ampèremètre en série.

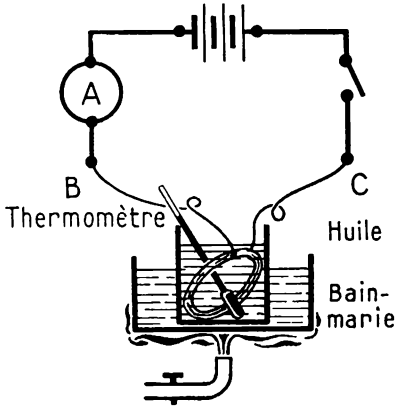


FIG. 6. — En général, la résistance d'un conducteur croît quand sa température augmente.

A la température ordinaire, l'intensité du courant est, par exemple, 1,1 *ampère*.

Chauffons l'huile. A mesure que la température s'élève, l'intensité du courant diminue. Quand l'huile atteint environ 100°, l'intensité n'est plus que 0,75 *ampère*.

Donc **la résistance du fil de cuivre croît avec la température.**

L'augmentation par degré en est d'environ 4 millièmes de sa valeur à 0°. Si la résistance est R à 0°, à t° elle augmente de 0,004 Rt et devient $R_t = R + 0{,}004\ Rt$, soit :

$$R_t = R\,(1 + 0{,}004\,t)$$

Le coefficient 0,004 se nomme le **coefficient de température** du cuivre.

Le coefficient de température n'est pas le même pour tous les conducteurs. Quelques valeurs en sont données dans le tableau de la page 45. Elles sont voisines de 4.10^{-3} pour les métaux purs, de 3.10^{-4}, c'est-à-dire 10 fois moindres pour les alliages. Pour la manganine, le coefficient de température est faible, 2.10^{-5}, et pratiquement négligeable. La résistance

du charbon, des solutions d'acides, de soude, de sels diminue quand la température s'élève, le coefficient de température de ces conducteurs est négatif.

7. Rhéostats de réglage.

Une résistance électrique introduite dans un circuit réduit l'intensité du courant qui y circulait. On utilise cette propriété pour régler l'intensité du courant dans un récepteur en mettant en série avec le récepteur une longueur plus ou moins grande d'un fil résistant. Cette résistance variable se nomme **rhéostat.** Elle est faite en maillechort

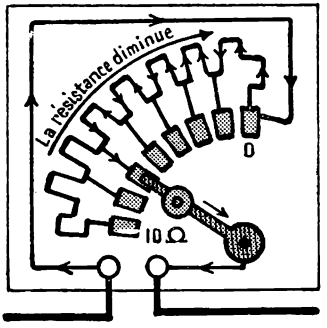


FIG. 7, — Schéma d'un **rhéostat à plots.** La résistance diminue quand on tourne la manivelle de gauche à droite.

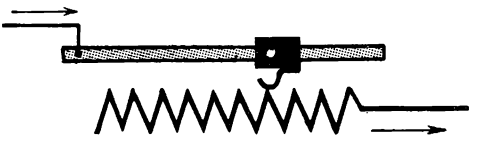


FIG. 8. — Schéma d'un **rhéostat à curseur.** Le fil résistant est enroulé sur un cylindre isolant. En poussant le curseur vers la droite on diminue la résistance du circuit.

ou en un alliage de fer, nickel et chrome. Pour qu'il tienne moins de place, le fil est boudiné ou enroulé sur du fibro-ciment ou de la porcelaine.

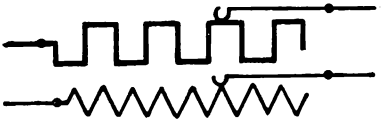


FIG. 9. — Symboles graphiques employés pour représenter un **rhéostat** dans les schémas électriques.

Les figures 7 et 8 représentent deux types de rhéostats, l'un à *plots*, l'autre à *curseur.*

Dans les dessins d'installations électriques, on représente une *résistance fixe* ou un *rhéostat* par les schémas de la figure 9.

RÉSUMÉ

1. — La résistance électrique d'un conducteur est sa propriété de réduire l'intensité du courant dans un circuit.

2. — Deux conducteurs ont des *résistances égales* quand ils peuvent se remplacer l'un par l'autre dans un circuit sans que l'intensité du courant change.

La résistance de l'ensemble de plusieurs conducteurs montés en série est la *somme des résistances* de chaque conducteur.

3. — L'unité de résistance est l'*ohm*. Elle est représentée par la résistance d'une colonne de mercure dont les dimensions sont fixées par la loi.
On fabrique en *manganine* des résistances étalonnées multiples et sous-multiples de l'ohm, ce qui permet de réaliser facilement une résistance de grandeur connue.
On peut mesurer la résistance d'un conducteur par substitution à ce conducteur, dans un circuit, de résistances étalonnées.

4. — La résistance d'un conducteur varie avec la température. La formule $R = R(1 + at)$
permet de calculer la résistance d'un conducteur à t° quand on connaît sa résistance à 0° et son *coefficient de température*.

5. — Les rhéostats sont des résistances variables que l'on place dans un circuit pour régler l'intensité du courant.

EXERCICES

1. Il existe des rhéostats dans lesquels le conducteur résistant est un liquide. Imaginer un rhéostat à liquide (nature du liquide à employer, vase, moyen de faire varier la résistance).

2. Dans les lampes à incandescence les plus employées, le filament de tungstène est à la température de 2 600° quand la lampe fonctionne. La résistance du filament est alors 230 *ohms*. Quelle est la résistance de la lampe à la température 20° C? Le coefficient de température du tungstène est $a = 4{,}5.10^{-3}$.

Réponse : 19,8 *ohms*.

3. Une résistance étalonnée en manganine a pour valeur 10 *ohms* à 0°. Quelle est sa résistance quand on l'emploie à 30°? Le coefficient de température de la manganine est $a = 2.10^{-5}$.

Réponse · 10,006 *ohms*.

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

1. Fils conducteurs de différentes natures et dimensions. — Il est utile de préparer une fois pour toutes et de conserver les conducteurs résistants utilisés dans la 4e et la 5e leçons, savoir :

un fil de ferro-nickel, $l = 0{,}30$ *m*, $d = 0{,}2$ *mm;*
un — ferro-nickel, $l = 2$ *m*, $d = 1$ *mm;*
un — fer, $l = 3$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm;*
un — maillechort, $l = 4$ *m*, $d = 1$ *mm;*
un — ferro-nickel, $l = 1$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm;*
un — maillechort, $l = 1$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm;*
un — RNC, $l = 1$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm.*

Ils sont terminés par des serre-fils soudés. La longueur indiquée est mesurée entre les serre-fils.

Pour qu'ils soient moins encombrants, on les enroule en boudins d'environ 20 *mm* de diamètre.

A chaque fil est fixée une étiquette indiquant sa nature, sa longueur et son diamètre.

*2. **Résistances marquées.*** — Les boîtes de résistances étalonnées à fiches sont très coûteuses et ne supportent que des courants faibles : nous n'en conseillons pas l'acquisition.

On les remplace par des résistances boudinées, avec serre-fils soudés des valeurs indiquées ci-dessous.

Les alliages RNC (fer, nickel, chrome), fabriqués par les Aciéries d'Imphy, conviennent bien pour construire ces résistances.

Avec du fil de 15/10, dont la résistance par mètre est environ 0,6 *ohm*, et qui peut supporter 6 *ampères*, on fera :

1 résistance de 0,1 *ohm;*
2 — 0,2 — ;
1 — 0,5 — ;
1 — 1 — ;

Avec du fil de 5/10, dont la résistance par mètre est environ 5,3 *ohms* et qui peut supporter 1,5 *ampère*, on fera :

2 résistances de 2 *ohms;*
1 — 5 —
1 — 10 —

On vérifiera la valeur de la résistance avant de souder les serre-fils.

Ces résistances seront étiquetées, on les conservera en les accrochant à des pointes sans tête fixées sur une planchette.

Résistance d'un fil.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie de 3 *éléments d'accumulateurs.*
Un ampèremètre 0-5 ampères, *gradué en dixièmes d'ampère.*
Un interrupteur.
Un fil de ferro-nickel : l = 4 m, d = 1 mm.
— — l = 1 m, d = 0,5 mm.
Un fil de maillechort : l = 1 m, d = 0,5 mm.
Un fil RNC l = 1 m, d = 0,5 mm.

LEÇON

On peut calculer la résistance d'un conducteur *homogène*[1] et de *section constante.* Nous nous limiterons au cas d'un fil cylindrique.

Vous savez que la section d'un tel fil est un cercle et que *la surface d'un cercle s'obtient en multipliant* $\pi = 3{,}14$ *par le carré du diamètre et en divisant le produit obtenu par* 4 *:*

$$S = \frac{\pi \times d^2}{4}.$$

Cette formule montre que *la surface d'un cercle est proportionnelle au carré du diamètre,* c'est-à-dire qu'en doublant le diamètre la surface devient 4 fois plus grande, en le décuplant, 100 fois plus grande, etc.

A. — Calcul de la résistance d'un fil.

1. Comment la résistance électrique d'un fil cylindrique de section constante varie-t-elle avec la longueur du fil ?

Vous savez que des résistances électriques mises bout à bout s'ajoutent. Un fil de 4 *mètres* de long peut être considéré comme fait de 4 fils de

1. Un fil homogène est un fil fait de la même matière dans toute sa longueur, par exemple un fil de fer, un fil de cuivre.

1 *mètre* en série (fig. 1); sa résistance R est donc 4 fois plus grande que celle d'un fil de 1 *mètre*.

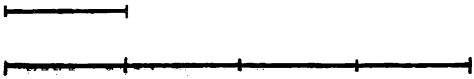


FIG. 1. — Les deux conducteurs sont de même nature et de même section ; le second est 4 fois plus long et 4 fois plus résistant que le premier.

La résistance d'un fil homogène de section constante est proportionnelle à sa longueur.

2. Comment la résistance d'un fil cylindrique varie-t-elle avec la section du fil ?

Dans le montage de la figure 2, plaçons entre les bornes B et C un fil

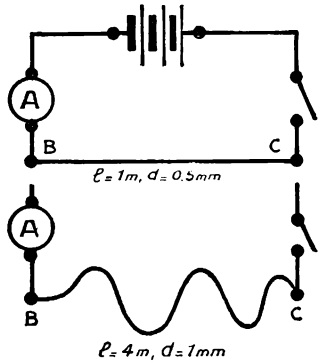


FIG. 2. — L'un des fils a 4 *mètres* de long et 1 *millimètre* de diamètre; l'autre, de même métal, a 1 *mètre* de long et 0,5 *millimètre* de diamètre : leur résistance est la même.

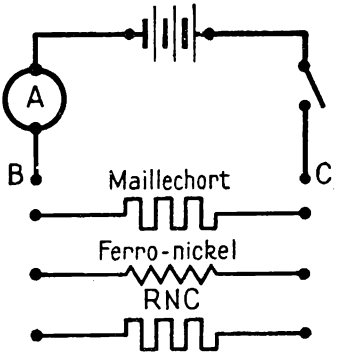


FIG. 3. — L'expérience montre que des fils de même longueur, de même section, mais de métaux différents ont des résistances différentes; (dimensions du fil : $l = 1$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm*).

de ferro-nickel long de 4 *mètres*, de 1 *millimètre* de diamètre. Le courant est, par exemple, 1,5 *ampères*.

Remplaçons ce fil par un fil du même ferro-nickel, long de 1 *mètre*, de diamètre 0,5 *millimètre*. Le courant est encore 1,5 *ampère*. *Les deux fils ont donc la même résistance.*

Raisonnons. Si le second fil ($d = 0{,}5$ *mm*) était long de 4 *mètres* comme le premier, sa résistance serait 4 fois plus grande. Or, sa section est

4 fois plus petite que celle du premier (d = 1 *mm*). **Les résistances des deux fils, à égalité de longueur, sont donc inversement proportionnelles aux sections.**

3. La résistance électrique d'un fil dépend de la nature du fil.

Plaçons successivement entre les bornes B et C (fig. 3) des fils de *même longueur*, de *même section*, mais de *natures différentes*, par exemple de maillechort, de ferro-nickel, de RNC.

Les intensités indiquées par l'ampèremètre diffèrent d'un fil à l'autre, donc les résistances sont différentes : **ces résistances dépendent de la nature des conducteurs.**

Pour chaque métal ou alliage, on a mesuré la résistance d'un fil 1 *millimètre carré* de section et de 1 *mètre de long*. Cette résistance, caractéristique de la substance considérée, se nomme **résistance spécifique.** On la représente par la lettre grecque ρ (rô) et on l'exprime en *ohm millimètre carré par mètre* ($\Omega\ mm^2/m$).

4. Indiquons la résistance spécifique de quelques corps usuels et leur coefficient de température.

La résistance spécifique des **métaux purs** est faible :

Cuivre : $\rho = 0{,}016\ \Omega\ mm^2/m$, $a = 4.10^{-3}$.
Argent : $= 0{,}015$ — , $a = 4.10^{-3}$.
Aluminium : $= 0{,}027$ — , $a = 4.10^{-3}$.
Fer : $\rho = 0{,}10$ — , $a = 6.10^{-3}$.

Celle des **alliages** est en général plus élevée :

Ferro-nickel, (Fe 75 %, Ni 25 %), $\rho = 0{,}80\ \Omega\ mm^2/m$, $a = 9.10^{-4}$
Maillechort, (Cu 60 %, Zn 25 %, Ni 15 %), $\rho = 0{,}30$ — , $a = 3.10^{-}$
Manganine, (Cu 84 %, Mn 12 %, Ni 4%), $\rho = 0{,}42$ — , $a = 0{,}2.10^{-4}$
Nichrome, (Ni 60 %, Cr 15 %, Fe 25 %), $\rho = 1{,}12$ — , $a = 1{,}7.10^{-4}$
RNC$_1$ (Ni 35 %, Cr 10 %, Fe 55 %), $\rho = 1{,}00$ — , $a = 3{,}2.10^{-4}$

Les **solutions d'acides, de bases ou de sels** ont une résistance spécifique plus grande encore, on l'exprime en *ohms centimètre carré par centimètre* ($\Omega\ cm^2/cm$), leur coefficient de température est négatif :

Solution à 10 % *d'acide sulfurique,* $\rho = 2{,}6\ \Omega\ cm^2/cm$, $a = -16.10^{-3}$
— *de soude,* $\rho = 3{,}2$ — , $a = -20.10^{-3}$
— *de sulfate de cuivre,* $\rho = 32{,}0$ — , $a = -22.10^{-3}$

Certains corps ont une résistance spécifique énorme que l'on évalue en *mégohms*[1] *centimètre carré par centimètre* ($M\Omega.cm^2/cm$). Ce sont les corps

1. 1 mégohm vaut 1 million d'ohms, son abréviation est MΩ.

que l'on nomme **isolants** et qui sont en réalité de très mauvais conducteurs. En voici trois exemples :

Papier ordinaire	$\rho = 0{,}5$	$M\Omega\ cm^2/cm.$
Verre ordinaire	$\rho = 90$	—
Caoutchouc vulcanisé	$\rho = 600.10^3$	—

5. On peut caculer la résistance électrique *R ohms* d'un fil dont on connaît la longueur *l mètres*, la section *s millimètres carrés* et la résistance spécifique ρ *ohms par millimètre carré et par mètre.*

Un fil de 1 *mètre* de long et 1 mm^2 de section a une résistance de ρ *ohms*,
— *l mètres* — 1 mm^2 — ρl —
— *l mètres* — *s* mm^2 — $\frac{\rho l}{s}$ —

Donc :

$$\boxed{R = \rho \frac{l}{s}}$$

m ; Ω ; mm^2 ; $\Omega\, mm^2/m$

B. — Applications

6. Résistance d'une ligne.

Quelle est la résistance d'un fil télégraphique en fer, long de 10 kilomètres, *de* 3 millimètres *de diamètre, dont la résistance spécifique est* 0,10 $\Omega\ mm^2/m$?

La longueur du fil est 10 000 *mètres*. Sa section :

$$s = \frac{3{,}14 \times 3 \times 3}{4} = 7\ mm^2.$$

Donc $$R = \frac{0{,}10 \times 10\,000}{7} = 143\ ohms.$$

7. Tableau des résistances des fils de cuivre.

Un tel tableau est reproduit à la fin de ce livre, page 512. Pour différents diamètres de fil, y sont indiquées la *section*, la *masse*, la *longueur* en mètres par kilogramme et la *résistance*.

L'usage de ce tableau facilite beaucoup les calculs; nous en donnerons trois exemples :

1° *Quelle est la résistance de* 100 m *de fil de cuivre de diamètre* 2,4 mm?

Le diamètre 2,4 *mm* est indiqué dans la première colonne du tableau. Le fil a une résistance de 3,81 Ω par *kilomètre*. La résistance pour 100 *m* est donc 0,381 *ohm*.

2° *Quelle est la résistance et la masse de* 1 000 m *de fil de cuivre de* 0,2 mm *de diamètre?*

Le diamètre 0,2 *mm* n'est pas dans le tableau. Mais celui de 2 *mm* s'y trouve. Or la résistance d'un fil, à longueur égale, est inversement proportionnelle à la section, soit 100 fois plus grande pour un diamètre de 0,2 *mm* que pour 2 *mm*. La masse est proportionnelle à la section, soit 100 fois plus petite.

Le fil de cuivre de 0,2 *mm* a donc une résistance de 548,8 *ohms* et une masse de 279 *grammes* par kilomètre.

3° *Quelle longueur de fil de nichrome de diamètre* 0,5 mm *faut-il pour obtenir une résistance de* 115 ohms?

La résistance d'un kilomètre de fil de *cuivre* de 0,5 *mm* est 87,812 Ω.

La résistance spécifique du nichrome est 1,12 Ω mm^2/m, soit 70 fois celle du cuivre. La résistance de 1 *m* de nichrome de 0,5 *mm* de diamètre est donc :

$$0{,}087\,8 \times 70 = 6{,}146 \text{ ohms.}$$

Pour obtenir 115 Ω, il faudra :

$$115 : 6{,}15 = 18{,}7 \text{ mètres.}$$

8. L'augmentation de résistance d'un conducteur chauffé peut servir à déterminer sa température.

Vous savez qu'en général la résistance d'un conducteur augmente quand la température s'accroît. Quand la température passe de 0° à $t°$, la résistance du conducteur passe de R à R_t et

$$R_t = R(1 + a\,t),$$

a est le coefficient de température du conducteur, pour le cuivre $a = 0{,}004$.

Les moteurs électriques, les dynamos, etc., s'échauffent en fonctionnant. Pour connaître l'élévation de température de leurs enroulements, on peut se servir de leur augmentation de résistance.

Problème. *Les bobines des inducteurs d'un moteur ont, à la température ambiante de* 15°, *une résistance de* 53 ohms. *Après quatre heures de marche du moteur, cette résistance devient* 62 ohms *et cesse de croître. Quelle est alors la température du fil de cuivre des bobines?*

Désignons par R la résistance des bobines à 0°. A 15° cette résistance est

$$R(1 + 0{,}004 \times 15),$$

d'où : $R(1 + 0{,}004 \times 15) = 53$

soit $R \times 1{,}06 = 53$

et $R = 53 : 1{,}06 = 50\ \Omega$

A la température de t^o que l'on cherche, la résistance est 62 Ω.

Donc : $50\ (1 + 0{,}004\ t) = 62$

$0{,}2\ t = 62 - 50 = 12$

et $t = 12 : 0{,}2 = 60$ *degrés.*

RÉSUMÉ

1. — La résistance d'un conducteur homogène, de section uniforme, est :

1° proportionnelle à sa longueur,

2° inversement proportionnelle à sa section,

3° variable avec la nature du conducteur.

2. — La *résistance spécifique* d'une substance est la résistance d'un fil de cette substance ayant 1 *millimètre carré* de section et 1 *mètre* de longueur.

3. — La résistance d'un conducteur de longueur 1 *m*, de section *s* mm^2, dont la résistance spécifique est ρΩ mm^2/m se calcule avec la *formule :*

$$R = \rho \frac{l}{s}.$$

4. — On utilise l'accroissement de la résistance d'un conducteur chauffé pour déterminer sa température.

EXERCICES

1. Quelle est la résistance d'une ligne télégraphique en fil de fer galvanisé, longue de 4 *kilomètres* et de 3 *millimètres* de diamètre? La résistance spécifique de ce fil est 0,16 Ω mm^2/m.

Réponse : 97,56 *ohms.*

2. Quelle est la longueur d'un fil de ferro-nickel de 1 *mm* de diamètre dont la résistance est 1 Ω? Chercher dans la leçon la résistance spécifique du ferro-nickel.

Réponse : 0,98 *mètre.*

3. On désire remplacer un fil de cuivre de 12/10 *mm* de diamètre par un fil d'aluminium de même longueur et de même résistance. Calculer le diamètre du fil d'aluminium. Chercher dans le livre les renseignements nécessaires pour effectuer le calcul.

Réponse : 1,56 *mm.*

4. On coupe en deux morceaux d'égale longueur un fil de résistance *R* ohms. On tord les deux morceaux ensemble. Quelle est la résistance du conducteur ainsi formé?

5. Pour fabriquer un élément de résistance, on se sert d'une feuille de tôle d'acier longue de 420 *mm*, large de 200 *mm*, épaisse de 0,1 *mm*, dont la résistance spécifique est 0,20 Ω mm^2/m. On y donne, dans le sens de la longueur, 9 coups de cisaille équidistants, longs de 400 *mm*, qui commencent alternativement à l'une et à l'autre des extrémités de la feuille comme l'indique la figure 4. Calculer la résistance de l'élément ainsi formé.

Réponse : 0,44 *ohm.*

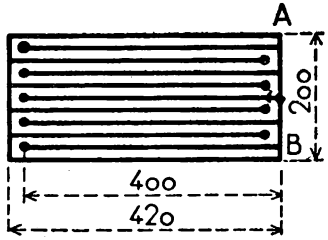


FIG. 4. — Figure pour l'exercice 5 : résistance d'une tôle découpée.

6. La résistance de l'induit d'une dynamo est 1,08 Ω à 20°. Après une longue période de fonctionnement, la résistance est devenue 1,2 Ω. Quelle est la température atteinte par l'induit?

Réponse : 50°.

7. Calcul de la résistance d'une bobine en fil de cuivre dont les dimensions sont données. Les dimensions de l'enroulement d'une bobine cylindrique sont indiquées sur la figure 5. L'enroulement est fait d'un fil de cuivre de 12/10 *mm*, émaillé, guipé coton; l'isolement augmente le diamètre du fil de 20/100 *mm*. Calculer : 1° la longueur du fil; 2° sa masse (sans tenir compte de l'émail et du coton); 3° sa résistance.

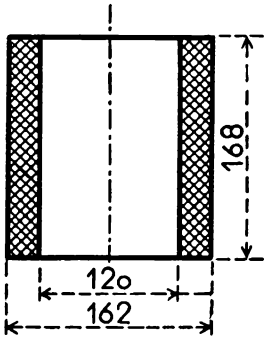


FIG. 5. — Figure pour l'exercice 7 : dimensions de l'enroulement d'une bobine.

Indications sur la solution. On détermine le nombre de spires et la longueur moyenne d'une spire. Une couche de spires compte 168 : 1,4 = *n* spires. L'épaisseur du bobinage, qui est 21 *mm*, correspond à 21 : 1,4 = *p* couches. La bobine est donc faite de $m = np$ spires.

Le diamètre moyen des spires est

$$(162 + 120) : 2 = d \text{ mm}.$$

La longueur moyenne d'une spire est πd *mm*.

Ce calcul n'est qu'approché, mais l'approximation du résultat qu'il fournit est pratiquement suffisante.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Résistivité. — Nous avons établi et utilisé la formule

$$R_\Omega = \rho_{\Omega mm^2/m} \times \frac{l_m}{s_{mm^2}} \qquad (1)$$

qui sert à calculer la résistance d'un conducteur homogène de section constante.

Dans cette formule les unités de longueur et de surface ne sont pas liées, la longueur est exprimée en *mètres* et la surface l'est en *millimètres carrés*. La formule n'est pas **cohérente**. La valeur numérique de la résistance spécifique ne peut être employée sans précautions, une telle formule doit toujours être accompagnée de l'indication des unités correspondantes.

Si nous exprimons la longueur en *mètres* et la section en *mètres carrés*, la formule devient cohérente; la résistance spécifique correspondante est appelée **résistivité** de la substance.

La résistivité est une grandeur physique caractéristique de la substance. L'unité de résistivité est l'*ohm mètre carré par mètre*, soit plus simplement l'*ohm mètre* ($\Omega.m$). La résistivité du cuivre est :

$$0{,}000\,000\,016 = 1{,}6.10^{-8}\ \Omega.m.$$

Nous avons utilisé dans cette leçon la notion de résistance spécifique de préférence à celle de résistivité car dans les calculs pratiques elle présente moins de risques d'erreurs.

Tension électrique. Volt.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de trois éléments.
Un ampèremètre 0-10 *ampères gradué en dixièmes d'ampère.*
Un interrupteur unipolaire.
Une lampe témoin.
Une résistance de 1 Ω.
Voltmètres divers.

LEÇON

1. Expériences avec une lampe témoin.

La lampe « témoin » des électriciens est constituée par une ampoule d'éclairage dont les bornes sont reliées à deux cordons conducteurs ordinairement terminés par une pointe métallique. Construisons notre lampe témoin avec une lampe de lanterne automobile dite « navette » marquée 6 V (*volts*) (fig. 1).

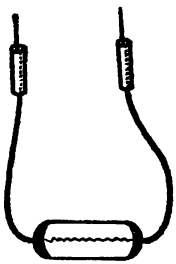


Fig. 1. — Lampe témoin d'électricien automobile.

Prenons l'accumulateur à 3 éléments que nous avons utilisé au cours de la 1re leçon. La lampe témoin brille faiblement lorsque nous « piquons » les bornes A et B avec les pointes (fig. 2); elle brille un peu plus lorsque nous « piquons » les bornes A et C et enfin elle éclaire normalement lorsque nous « piquons » en A et D.

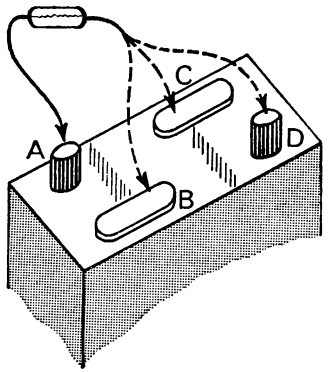


Fig. 2. — Par son éclat, la lampe témoin vous montre que la tension entre A et D est plus grande que celle entre A et B.

L'éclat de la lampe nous montre qu'un courant la parcourt et que ce courant prend des valeurs croissantes du 1er au 3e essai. Ce que nous pourrions vérifier en installant un ampèremètre en série avec la lampe.

2. Tension électrique.

Nous dirons qu'une **tension électrique** (ou simplement une tension) règne entre les bornes A et B. Nous exprimons ainsi le fait expérimental qu'un courant prend naissance dans un conducteur (ici la lampe témoin) qui vient à être branché entre ces deux bornes.

Cette tension électrique existe même lorsque la lampe n'est pas branchée. De même qu'en un point d'une canalisation de gaz ou d'air comprimé existe une certaine pression qui se manifeste, par une fuite, lorsque nous perçons un petit trou en ce point, mais qui **existait déjà avant** le percement du trou. La tension électrique entre les bornes de l'accumulateur est **prête à produire un courant :** elle le produit effectivement dès que nous réunissons les deux bornes par un conducteur.

Une lampe témoin construite non plus avec une lampe de lanterne automobile mais avec une lampe d'éclairage ordinaire, marquée par exemple 220 V (*volts*), nous montre, d'une façon analogue, qu'il existe une tension entre les deux alvéoles d'une prise de courant et plus généralement entre les deux conducteurs d'un secteur de distribution d'électricité.

L'expérience ne doit être faite qu'avec précautions car *il est dangereux de toucher simultanément deux pièces métalliques entre lesquelles règne une tension électrique.*

3. Une tension électrique peut être plus ou moins grande.

La tension électrique entre deux points est finalement le pouvoir de créer un courant dans un conducteur branché entre ces deux points.

Logiquement nous dirons que les tensions entre les bornes de chacun des trois éléments de la batterie d'accumulateurs (entre A et B, B et C, C et D) sont **égales** parce que la **même lampe** témoin branchée successivement entre A et B, B et C puis C et D, brille toujours de la même façon, indiquant ainsi qu'elle est parcourue par le même courant au cours des trois essais.

De même, nous dirons que la tension entre A et C est plus grande que la tension entre A et B parce que le courant dans la lampe, branchée entre A et C, est plus intense que le courant dans la **même lampe** branchée entre A et B.

Une tension est d'autant plus grande que le courant qu'elle produit dans une résistance donnée est plus intense.

La tension électrique entre deux points est aussi appelée **différence de potentiel** entre ces points.

4. Les tensions se mesurent en volts.

Par définition : **une tension est égale à 1 volt** (symbole V) **lorsqu'elle produit un courant de 1 ampère à travers une résistance de 1 ohm.**

Lorsqu'une tension produit à travers une résistance de 1 *ohm* un courant de 2, 3 ou 4 *ampères*, on dit que la tension est de 2, 3 ou 4 *volts*. D'une façon générale, la tension est de U *volts* lorsque le courant qu'elle produit dans une résistance de 1 *ohm* est de U *ampères*.

5. Les tensions en série d'additionnent.

Fabriquons un « circuit témoin », analogue à la lampe témoin, constitué d'une résistance, en ferro-nickel, de 1 Ω et d'un ampèremètre 0-10 *A* en série. La résistance de l'ampèremètre est très petite, si bien que la résistance de l'ensemble est pratiquement 1 Ω (fig. 3).

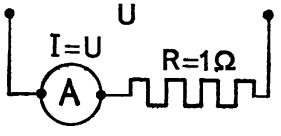


Fig. 3. — Le circuit ampèremètre-résistance de 1 Ω indique directement la tension entre ses bornes.

Branchons ce circuit témoin successivement aux bornes de chacun des éléments de l'accumulateur. Nous lisons un courant de 2 *A* dans chacun des trois essais.

Entre les bornes de chacun des éléments règne donc une tension de 2 *volts*. Branchons ensuite ce circuit témoin entre A et C ; l'ampèremètre marque 4 *A* : la tension entre A et C est 4 *volts*. La même expérience faite entre A et D, nous montre que la tension entre A et D est 6 *volts*.

Ainsi la tension entre A et C (4 *V*) est la somme de la tension entre A et B (2 *V*) et de celle entre B et C (2 *V*). De même la tension entre A et D (6 *V*) est la somme des tensions entre A et B, entre B et C et entre C et D.

D'une façon générale, la tension entre deux points M et Q d'un circuit est égale à la *somme des tensions entre les bornes des conducteurs successifs que l'on doit parcourir pour aller de* M *en* Q.

6. La loi d'Ohm.

Une série de résistances AB, BC etc..., de 1 *ohm* chacune est parcourue par un courant de I *ampères*. D'après le paragraphe 4, la tension entre les bornes de chacune d'elles est $1 \times I = I$ *volts*.

Soit R le nombre de résistances, l'ensemble constitue alors une résistance de R *ohms*. Entre ses bornes règne une tension égale à la somme

des R tensions égales chacune à I, soit au total RI *volts*. D'où, en désignant par U cette tension, la formule :

$$\underset{volts}{U} = \underset{ohms}{R}\ \underset{ampères}{I}$$

qui est l'expression de la loi d'Ohm.

La tension (*en volts*) **aux bornes d'un élément de circuit est égale au produit de sa résistance** (*en ohms*) **par le courant qui le parcourt** (*en ampères*).

Cette loi s'applique à une lampe d'éclairage, à un rhéostat, à une résistance chauffante, à un fil de connexion mais elle ne s'applique pas du tout à un moteur ou à un accumulateur. Il ne faut l'employer que pour des éléments de circuit, dits **résistances mortes,** qui ne participent ni à un phénomène mécanique (ce qui exclut les moteurs et les dynamos), ni à un phénomène chimique (ce qui exclut les piles et accumulateurs).

7. On mesure les tensions avec un voltmètre.

Au cours de cette leçon nous avons mesuré une tension grâce à une résistance de 1 *ohm* mise en série avec un ampèremètre. Cet ensemble,

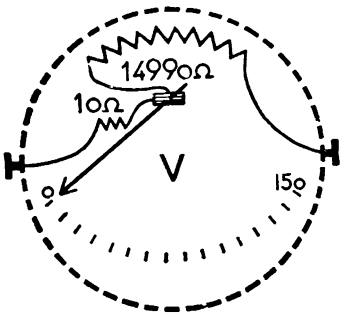


FIG. 4. — La résistance additionnelle d'un voltmètre est presque toujours logée dans le boîtier de l'appareil. Elle est ici de 14 990 *ohms*.

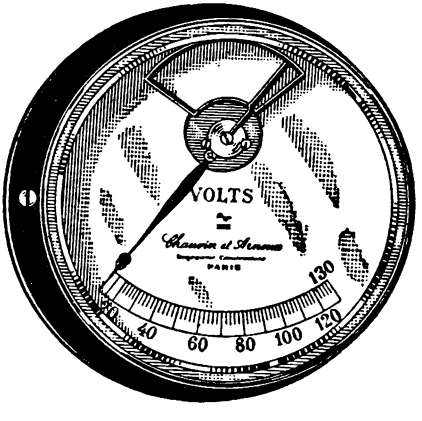


FIG. 5. — **Voltmètre électromagnétique.** Remarquer le dispositif amortisseur des oscillations de l'aiguille.

que l'on pourrait réunir dans un même boîtier, constitue donc un **voltmètre** que l'on pourrait graduer directement en *volts*.

Mais ce voltmètre serait très médiocre. Il convient en effet que la résistance soit **grande** et l'ampèremètre **sensible** pour que le voltmètre consomme très peu de courant et ne modifie guère le régime du générateur et du circuit aux bornes desquels on le branche. Par exemple, l'aiguille d'un voltmètre, dont le cadran porte 150 divisions, dévie de toute l'échelle quand l'appareil est traversé par un courant de 0,01 *ampère*; la résistance totale de l'instrument est 15 000 *ohms*, constituée pour 14 990 *ohms* par la résistance additionnelle en fil fin de manganine.

Ce voltmètre peut mesurer des tensions comprises entre 0 et 150 *volts* : on dit que son *calibre* est 150 *volts*.

FIG. 6. — Ce symbole représente un **voltmètre** dans les schémas électriques.

Un voltmètre est donc un ampèremètre très sensible auquel est ajoutée en série une grande résistance (fig. 4, 5 et 6).

Il existe des voltmètres *électromagnétiques*, *thermiques* et à *cadre mobile et aimant fixe*. Ces derniers sont polarisés. Les *calibres* usuels sont 3, 15, 150 et 300 *volts*.

8. Un ampèremètre et un voltmètre se montent différemment.

1° Un **ampèremètre** se place avant ou après le récepteur dans lequel on veut mesurer le courant, *en* **série** *avec le récepteur*.

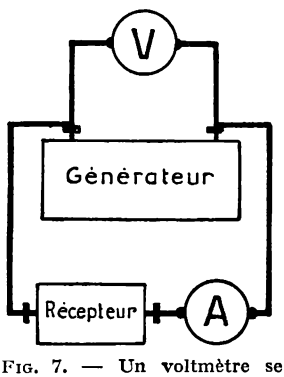


FIG. 7. — Un voltmètre se monte en **dérivation**. Un ampèremètre se monte **en série**.

Il ne faut pas s'aviser de le brancher seul, directement aux bornes d'un générateur; c'est en effet un appareil dont la résistance électrique est très faible, souvent inférieure à 0,01 *ohm*, le courant qui s'établirait serait très intense, il dépasserait de beaucoup le calibre de l'ampèremètre et détériorerait l'instrument.

2° Un **voltmètre** se branche directement aux points entre lesquels on désire mesurer la tension; on dit qu'il est en **dérivation,** *entre ces points*. Sa résistance électrique, qui est grande, limite le courant à une intensité qui ne risque pas de détériorer l'instrument, du moins *si son calibre a été bien choisi*. Des fils fins, mais bien isolés, suffisent pour brancher un voltmètre puisqu'il s'agit de courants faibles.

La figure 7 indique ces montages différents d'un ampèremètre et d'un voltmètre.

RÉSUMÉ

1. — Une tension électrique existe entre deux points lorsqu'un conducteur branché entre ces points est parcouru par un courant.
Une tension est d'autant plus grande que le courant qu'elle produit dans une résistance donnée est plus intense.

2. — Une tension est égale à 1 *volt* lorsqu'elle produit un courant de 1 *ampère* à travers une résistance de 1 *ohm*.

3. — La tension U (en *volts*) aux bornes d'une résistance morte est égale au produit de la résistance R (en *ohms*) par le courant I qui la parcourt (en *ampères*) : $U = RI$

4. — On mesure une tension avec un voltmètre. Un voltmètre est constitué par une grande résistance en série avec un ampèremètre très sensible.

EXERCICES

1. Examiner les voltmètres servant aux expériences de classe et les voltmètres à poste fixe de l'installation électrique.
Noter pour chacun d'eux
a) son principe (électromagnétique, thermique, à cadre mobile et aimant);
b) son calibre;
c) sa graduation, est-elle uniforme?
d) sa sensibilité, en admettant qu'on peut lire l'indication de l'aiguille à 1/2 division de la graduation près.

2. Mesurer la tension entre les bornes :
1° d'une prise de courant alimentée par le secteur;
2° d'une batterie d'accumulateurs;
3° d'une pile de lampe de poche.
Utiliser d'abord un voltmètre à fort calibre : 150 *volts* par exemple; puis si la tension lue sur ce voltmètre est inférieure, par exemple, à 15 *volts*, employer un voltmètre de calibre 0-15 *volts*. Plus le calibre de l'appareil est faible, plus cet appareil est sensible.

3. La tension entre les bornes d'une prise de courant est 100 V, l'intensité absorbée par un fer à repasser électrique branché sur cette prise est 3,3 *A*. Quelle est la résistance de ce fer?

4. Compléter le tableau suivant concernant 3 générateurs et 3 circuits différents.

Circuits	U volts	R ohms	I ampères
a	110	5	
b		10	2,5
c	60		8

Couplage des résistances. Force électromotrice.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de 3 éléments et une pile Leclanché.
Trois résistances marquées : 2 Ω, 3 Ω, 4 Ω.
Deux ampèremètres : 0-1 A et 0-10 A.
Un voltmètre : 0-15 V.
Deux fils nus de ferro-nickel (l = 1 m, d = 0,5 mm).
Un interrupteur bipolaire.
Un rhéostat de lampes et un rhéostat à curseur (5 Ω environ).
Un voltmètre à plusieurs sensibilités.
Un ampèremètre de contrôle et sa série de shunts.

LEÇON

A. — Couplage des résistances électriques.

1. Mesure industrielle d'une résistance.

Soit à mesurer la résistance d'une bobine de fil (fig. 1). Nous faisons passer un courant dans la bobine et nous mesurons :

1° *avec un ampèremètre*, le courant I *ampères*, soit par exemple I = 0,8 *ampères*;

2° avec *un voltmètre*, la tension U *volts* entre les extrémités de la bobine, soit par exemple U = 4 *volts*.

La résistance cherchée est $R = U : I$, soit dans le cas de l'expérience :

$$R = 4 : 0{,}8 = 5 \text{ ohms.}$$

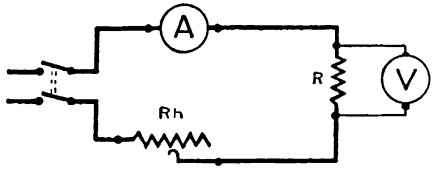


Fig. 1. — Montage d'un ampèremètre A, d'un voltmètre V et d'un rhéostat Rh pour mesurer la résistance R. Le rhéostat sert à limiter le courant pour éviter les détériorations.

Cette méthode ne convient que pour des *résistances moyennes*. Si la résistance est très grande, plusieurs milliers d'ohms, elle ne laisse passer, avec les sources de courant usuelles, qu'un courant trop faible pour être mesuré avec précision par un ampèremètre. Si la résistance est très petite, de l'ordre du millième d'ohm, c'est la tension à ses bornes qui est trop faible pour être mesurée avec un voltmètre.

2. Couplage en série.

Les résistances sont montées bout à bout. Nous en avons vu plusieurs exemples.

Vous savez que **la résistance totale est la somme des résistances partielles** et que **l'intensité du courant est la même dans toutes les résistances partielles.**

3. Couplage en dérivation ou en parallèle.

Si l'on réunit ensemble toutes les extrémités des résistances par lesquelles entre le courant, et ensemble toutes les extrémités par lesquelles il sort, les **résistances sont groupées en dérivation ou en parallèle** (fig. 2).

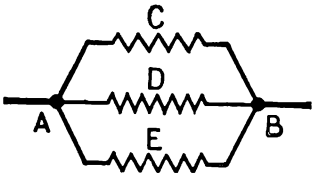


FIG. 2. — Les trois résistances C, D, E, qui ont mêmes extrémités A et B, sont montées **en dérivation.**

Le courant avant et après les résistances se nomme **courant principal,** les courants dans chaque résistance partielle sont les **courants dérivés.**

On nomme **résistance équivalente** à l'ensemble des résistances partielles la résistance unique qui, remplaçant le groupe des résistances dérivées, ne modifierait ni le courant principal ni la tension entre A et B.

En nous limitant, pour simplifier les calculs, au cas de deux résistances en parallèle, nous nous proposons d'établir les relations entre le courant principal I et les courants dérivés i_1 et i_2 et de déterminer la résistance R équivalente au faisceau des résistances dérivées r_1 et r_2 (fig. 3).

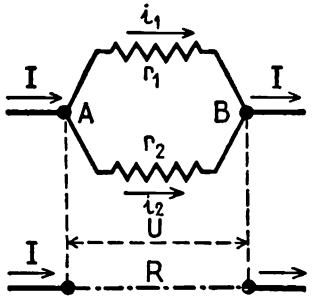


FIG. 3. — Les courants i_1 et i_2 sont inversement proportionnels aux résistances qu'ils parcourent. R est la **résistance équivalente** à l'ensemble des résistances r_1 et r_2.

1° *Le courant principal* I *est la somme des courants dérivés* i_1 *et* i_2, nous l'avons établi dans la 3e leçon :

$$I = i_1 + i_2. \qquad (1)$$

La tension entre les points A et B a la même valeur quelle que soit la dérivation considérée. La loi d'Ohm appliquée à chacune des dérivations donne :

$$U = r_1 i_1, \qquad U = r_2 i_2,$$

d'où :

$$r_1 i_1 = r_2 i_2 \tag{2}$$

Les courants dérivés sont inversement proportionnels aux résistances correspondantes.

De la relation (2) nous tirons $i_2 = i_1 \times \frac{r_1}{r_2}$, et en portant cette valeur dans (1) :

$$I = i_1 + i_1 \frac{r_1}{r_2} = i_1 \times \frac{r_1 + r_2}{r_2}$$

d'où : $i_1 = I \dfrac{r_2}{r_1 + r_2}$, de même $i_2 = I \dfrac{r_1}{r_1 + r_2}$.

2° Quand la résistance équivalente R remplace les résistances dérivées r_1 et r_2, le courant dans R est I, la tension entre les points A et B reste U, donc :

$$U = RI = r_1 i_1 = r_2 i_2.$$

De cette relation, nous tirons :

$$I = \frac{U}{R}, \qquad i_1 = \frac{U}{r_1}, \qquad i_2 = \frac{U}{r_2}$$

et

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2},$$

soit :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}. \tag{3}$$

L'inverse de la résistance équivalente est la somme des inverses des résistances dérivées.

Vous étudierez vous-même le cas de trois résistances en dérivation.

Application numérique.

Entre deux points A et B d'un circuit existe une tension constante de 110 *volts*, 5 lampes de chacune 220 *ohms* sont branchées entre A et B.

1° La résistance équivalente R est telle que

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{220} + \frac{1}{220} + \frac{1}{220} + \frac{1}{220} + \frac{1}{220} = \frac{5}{220}$$

donc $$R = 220 : 5 = 44 \text{ } ohms.$$

2° Le courant dans chaque dérivation est $i = 110 : 220 = 0{,}5$ *ampère* et le courant total est

$$I = 0{,}5 \times 5 = 2{,}5 \text{ } ampères.$$

4. Voici quelques applications du couplage de résistances.

a) ***Rhéostat de lampes.*** Un tel rhéostat est constitué par des lampes à incandescence ordinaires montées en dérivation comme l'indique la figure 4 et commandées par des interrupteurs. Plus on allume de lampes, plus l'intensité est grande dans l'appareil récepteur ou, en d'autres termes, plus la résistance du circuit est faible.

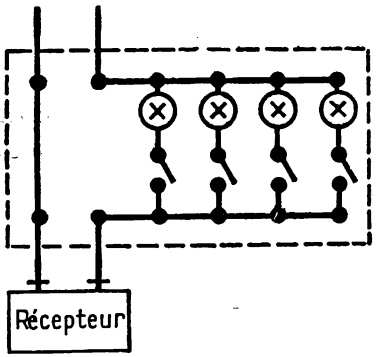


FIG. 4. — **Rhéostat de lampes.** Le pointillé représente la plaque sur laquelle sont fixés les interrupteurs et les douilles de lampes.

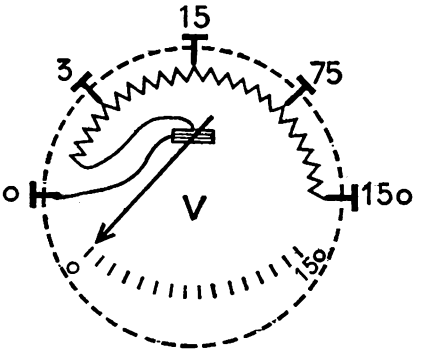


FIG. 5. — **Voltmètre à quatre sensibilités.** De 0 à 3 *V*, la résistance de l'instrument est 300 Ω; de 0 à 15 *V*, 1 500 Ω; de 0 à 75 *V*, 7 500 Ω; de 0 à 150 *V*, 15 000 Ω.

b) ***Voltmètre à plusieurs sensibilités.*** Soit un voltmètre à cadre mobile et aimant dont l'aiguille dévie des 150 divisions du cadran pour une intensité de 0,01 *ampère*. La résistance du cadre et de ses accessoires est 10 *ohms* (fig. 5).

Avec une résistance additionnelle de 14 990 *ohms*, la résistance totale de l'instrument devient 15 000 *ohms* et il faut à ses bornes

$$U = RI = 15\,000 \times 0{,}01 = 150 \text{ } volts.$$

pour produire la déviation totale de l'aiguille; 1 division de l'échelle correspond à 1 *volt*.

En faisant une prise sur la résistance additionnelle pour ramener la résistance totale de l'instrument à 7 500 *ohms*, la déviation totale est obtenue avec

$$7\,500 \times 0{,}01 = 75 \text{ volts.}$$

Une division de l'échelle vaut 0,5 *volts*.

De même, des bornes avec prises à 1 500 *ohms* et à 300 *ohms* donnent des *sensibilités* ou calibres de 15 *volts* et de 3 *volts*.

c) ***Shunts d'ampèremètres.*** Un milliampèremètre est un ampèremètre très sensible. Par exemple, un modèle très employé à une échelle de 100 divisions, et une intensité de 0,01 *ampère* suffit pour produire la déviation totale de l'aiguille; chaque division de l'échelle correspond à 0,000 1 *ampère*. La résistance de l'instrument est 10 *ohms*.

Avec un tel instrument, il est possible de mesurer des courants de grande intensité : il suffit de réunir ses deux bornes par une résistance nommée **shunt**[1] calculée pour dériver une fraction déterminée du courant principal (fig. 6).

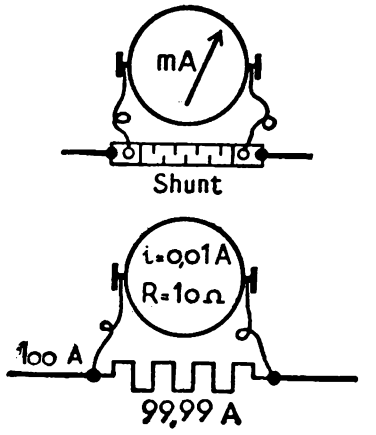


FIG. 6. — En haut, représentation schématique d'un **ampèremètre avec son shunt.**

En bas, milliampèremètre muni d'un shunt pour 100 *ampères*. Le dix-millième du courant total à mesurer passe dans le milliampèremètre.

Par exemple, pour que le milliampèremètre de 0,01 *ampère* et 10 *ohms* serve à mesurer des courants jusqu'à 100 *ampères*, il faut que le courant principal, quand il a sa valeur maximale, se partage en 0,01 *ampère* dans le milliampèremètre et 99,99 *ampères* dans le shunt. Résistances et intensités dérivées sont inversement proportionnelles, si R est la résistance du milliampèremètre et S celle du shunt

$$R \times 0{,}01 = S \times 99{,}99.$$

Or $R = 10$ *ohms*, donc

$$S = 10 \times \frac{0{,}01}{99{,}99} = \frac{1}{999{,}9} \text{ ohm}$$

soit approximativement 0,001 *ohm*.

1. *Shunt* est un mot anglais qui signifie *dérivation*.

Un seul milliampèremètre avec des shunts pour 5, 10, 50, 100, 1 000 ampères permet de mesurer tous les courants usuels (fig. 7).

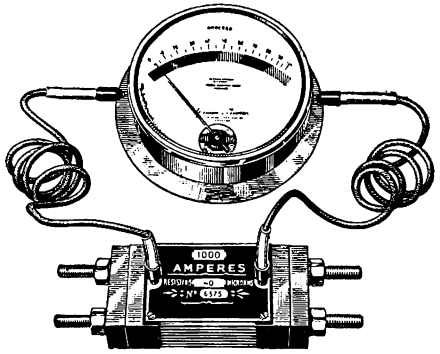


FIG. 7. — Cet ampèremètre est muni d'un shunt pour 1 000 *ampères*.

Les milliampèremètres à cadre mobile et aimant fixe de construction récente sont tous réglés pour donner leur déviation totale avec 0,1 *volt* à leurs bornes. Les shunts qui leur sont destinés sont dits à 0,1 *volt*.

Les milliampèremètres électromagnétiques sont réglés à 0,3 *volt* et leurs shunts dits à 0,3 *volt*.

Les shunts sont fabriqués avec des lames de manganine que les constructeurs ajustent à la résistance voulue par des traits de scie plus ou moins profonds (fig. 8).

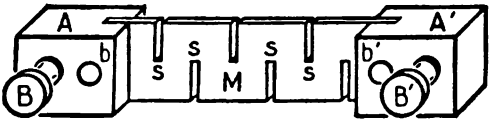


FIG. 8. — **Shunt d'ampèremètre.** Les traits de scies dans la lame de manganine ajustent le shunt à la résistance voulue. A et A′ sont des blocs de laiton; B et B′ les bornes où sont fixés les fils de ligne; *b* et *b′* des trous pour les broches des cordons aboutissant au milliampèremètre.

d) ***Potentiomètre.*** Pour appliquer à un appareil électrique une tension déterminée, on fait passer un courant dans une résistance ou un rhéostat AB (fig. 9), et l'on branche l'appareil entre la borne A et un curseur mobile C.

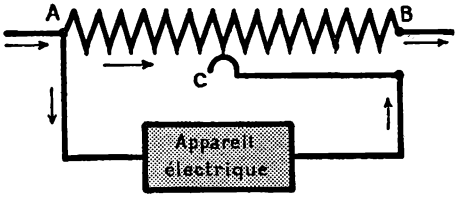


FIG. 9. — **Potentiomètre.** Il sert à appliquer aux bornes du récepteur une fraction de la tension existant entre les points A et B.

En déplaçant le curseur de A vers B, la tension appliquée à l'appareil croît depuis 0 jusqu'à la tension existant entre A et B. Cette tension maximum peut d'ailleurs être réglée en modifiant l'intensité du courant dans la potentiomètre.

B. — Chute de tension dans une ligne électrique.

5. Le passage du courant dans une ligne électrique s'accompagne d'une chute de tension.

Réalisons une installation électrique en réduction. Le générateur est une batterie de trois éléments d'accumulateurs; le récepteur, une résistance de quelques ohms avec un interrupteur bipolaire; une ligne résistante de deux fils nus de ferro-nickel (longueur : 1 *m*, diamètre : 0,5 *mm*) réunit les bornes du générateur à celles du récepteur (fig. 10).

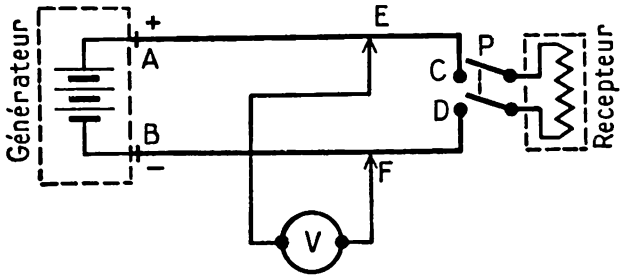


FIG 10. — La résistance de la ligne produit une diminution de la tension entre fils lorsqu'on parcourt cette ligne du générateur au récepteur.

1° Avec un voltmètre, mesurons :

a) la tension entre les bornes A et B du générateur : nous trouvons U = 5,5 *volts*.

b) la tension entre les bornes C et D du récepteur : nous trouvons U′ = 1,1 *volt*.

La seconde tension est plus faible que la première : on dit qu'**entre le générateur et le récepteur, il se produit une chute de tension** $u = U - U'$ **de 4,4 *volts*.**

2° Déplaçons simultanément, sur les fils de ligne, depuis le générateur jusqu'au récepteur, les extrémités dénudées E et F des deux fils du voltmètre. La tension entre les points E et F, qui est 5,5 *volts* quand E et F sont confondus avec A et B, diminue à mesure que les contacts s'éloignent du générateur pour atteindre 1,1 *volt* quand E et F arrivent aux bornes du récepteur.

La tension entre les fils de ligne diminue régulièrement lorsqu'on s'éloigne du générateur.

3° Ouvrons l'interrupteur P. La tension entre les bornes C et D est alors égale à la tension entre les bornes A et B.

Quand la ligne ne débite pas de courant, la tension est constante tout le long : il n'y a pas de chute de tension.

4° Refermons l'interrupteur P. Mesurons les tensions. Nous trouvons :

entre A et C	$u_1 = 2{,}2$ *volts;*
entre C et D	$U' = 1{,}1$ *volt;*
entre D et B	$u_2 = 2{,}2$ *volts.*

Nous vérifions que la tension U entre A et B est égale à la somme $u_1 + U' + u_2$. D'une façon générale si r_1 est la résistance du fil de ligne AC et r_2 celle du fil de ligne BD, les tensions u_1 et u_2 sont respectivement égales à $r_1 I$ et $r_2 I$; d'où les égalités :

$$U = u_1 + U' + u_2 \qquad U - U' = u_1 + u_2 = r_1 I + r_2 I = (r_1 + r_2) I.$$

La chute de tension dans une ligne, c'est-à-dire la diminution de la tension régnant entre les fils aux deux extrémités, est le produit de la résistance totale de la ligne par le courant qui la parcourt.

6. La chute de tension dans une ligne est proportionnelle à la densité de courant.

Dans une ligne de longueur l *mètres*, de résistance R *ohms*, parcourue par un courant de I *ampères*, la chute de tension en volts est :

$$u = RI.$$

La résistance R a pour valeur $\rho \frac{l}{s}$, donc

$$u = \rho \frac{l}{s} I = \rho l \frac{I}{s}. \qquad (1)$$

On donne au rapport $d = \frac{I}{s}$, dans lequel I est exprimé en *ampères* et s en *millimètres carrés*, le nom de **densité de courant.**

La densité de courant dans un conducteur est donc le quotient de l'intensité du courant (en ampères) par la section (en millimètres carrés) du conducteur.

On l'évalue en *ampères par millimètre carré.*

La formule (1) devient

$$u = \rho ld.$$

Elle montre que la chute de tension est proportionnelle à la longueur de la ligne, à la résistivité du métal qui la constitue et à la densité de courant.

Dans une ligne de longueur déterminée, on réduit la chute de tension en faisant la ligne en cuivre dont la résistivité est faible et en diminuant la densité de courant ainsi que nous l'expliquerons plus loin.

Dans les installations d'éclairage, la chute de tension aux bornes des lampes, depuis le compteur, ne doit pas dépasser 3 % de la tension de l'installation. Pour les installations de moteurs, la chute de tension maximale admissible est 5 %.

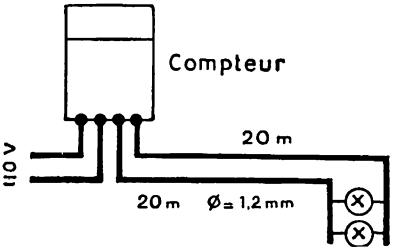


FIG. 11. — Pour que la chute de tension, depuis le compteur jusqu'aux lampes, ne dépasse pas 3 %, le courant doit rester ici inférieur à 5,4 *ampères.*

Exercice. — *Dans un appartement, une ligne électrique comprenant un fil d'amenée et un fil de retour du courant réunit le compteur aux appareils d'éclairage. La distance du compteur aux appareils d'éclairage est de* 20 *m. La ligne est faite d'un fil de cuivre de* 1,2 *mm de diamètre d'une résistance de* 15,24 Ω *au kilomètre. La tension entre les fils à la sortie du compteur est* 110 *V. La chute de tension jusqu'aux appareils d'éclairage ne doit pas dépasser* 3 %. *Calculer le courant le plus élevé admissible dans la ligne* (fig. 11).

Le conducteur constituant la ligne est long de 20 *m* aller et 20 *m* retour, soit 40 *m*; sa résistance est de :

$$0{,}015\,24 \times 40 = 0{,}61\ \Omega.$$

La chute de tension ne doit pas dépasser

$$110 \times 0{,}03 = 3{,}3\ \text{V}.$$

Il faut donc que l'intensité du courant dans la ligne reste inférieure à

$$3{,}3 : 0{,}61 = 5{,}4\ \textit{ampères}.$$

C. — Force électromotrice d'un générateur.

7. Expérience avec une pile Leclanché.

Voici une pile Leclanché que nous étudierons plus en détail au cours de la 9e leçon. Formons un circuit composé de cette pile, d'un rhéostat d'environ 5 *ohms*, d'un ampèremètre de calibre 1 *ampère* et d'un interrupteur. Un voltmètre de calibre 3 *volts* est en dérivation entre les bornes de la pile (fig. 12).

1° A **vide,** c'est-à-dire quand, le circuit étant ouvert, la pile ne débite aucun courant, la tension entre ses bornes est 1,5 *volt.*

2° En **charge,** c'est-à-dire quand, le circuit étant fermé, la pile débite un courant, la tension est plus petite : elle dépend du courant débité. Par exemple elle est :

1 *volt* pour un courant de 0,25 *ampère,*
0,3 *volt* — — 0,60 *ampère.*

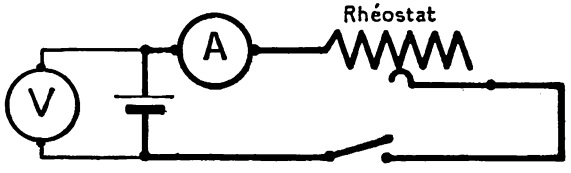


FIG. 12. — **Montage d'une pile Leclanché** débitant dans un rhéostat.

La tension aux bornes de la pile diminue à mesure que la charge (courant débité) augmente.

8. Un générateur est caractérisé par sa force électromotrice et sa résistance intérieure.

Les phénomènes chimiques, dont la pile est le siège, produisent la tension E = 1,5 *V* qui règne entre ses bornes à vide. Cette tension garderait la même valeur, quel que soit le courant débité, si n'intervenait pas la **résistance que la pile offre elle-même** au passage du courant. C'est, qu'en effet, le courant passe à travers la pile, du pôle négatif au pôle positif, parcourant ainsi divers milieux conducteurs (zinc, liquide, charbon) dont l'ensemble possède une résistance électrique.

Soit *r* cette résistance ; elle produit une diminution *r* I de la tension aux

bornes, de la même façon que la résistance des fils d'une ligne. La tension U aux bornes de la pile débitant le courant I est donnée par la formule

$$U = E - rI \qquad (1)$$

E est appelé **force électromotrice** de la pile (abrév. f. é. m.).

r est appelé **résistance intérieure** de la pile.

Des essais du paragraphe précédent nous tirons : E et r.

1° E = f. é. m. de la pile Leclanché = tension aux bornes à vide = 1,5 V.

2° Appliquons la formule (1) à un essai en charge

$$I = 0{,}6\ A; \qquad U = 0{,}3\ V \qquad E = 1{,}5\ V$$

$$0{,}3 = 1{,}5 - 0{,}6\,r \qquad \text{D'où} \qquad r = \frac{1{,}5 - 0{,}3}{0{,}6} = 2\ \Omega.$$

Tout générateur est caractérisé par une f. é. m. et une résistance intérieure. C'est la formule $U = E - rI$ qu'il faut appliquer à tous les générateurs : piles, accumulateurs, dynamos.

Leur appliquer la formule des résistances mortes $U = RI$ serait une **erreur très grave.**

La résistance intérieure des générateurs est ordinairement petite. Pour un élément d'accumulateur elle est très faible : la tension aux bornes reste pratiquement égale à la f. é. m.; sensiblement 2 *volts* pour tous les courants que l'accumulateur peut débiter sans risque de détérioration. Pour tous les générateurs industriels en fonctionnement normal le produit rI, dit **chute ohmique,** est beaucoup plus petit que la f. é. m. E : la tension aux bornes diffère peu de la force électromotrice.

RÉSUMÉ

1. — Les résistances se couplent en série ou en dérivation.

En série, la résistance équivalente est la somme des résistances :

$$R = r_1 + r_2 + \dots$$

En dérivation, l'inverse de la résistance équivalente est la somme des inverses des résistances :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots$$

2. — Les shunts d'ampéremètres sont des résistances de faibles valeurs que l'on monte en dérivation aux bornes des milliampèremètres pour qu'il ne passe dans ces derniers qu'une fraction connue du courant à mesurer.

3. — La tension entre les fils d'une ligne de distribution électrique diminue lorsqu'on parcourt la ligne du générateur vers les récepteurs. La diminution entre la tension à l'origine et la tension au bout de la ligne, est appelée chute de tension en ligne. Elle est donnée par la formule $u = rI$, où r est la résistance des deux fils de ligne.

4. — La tension aux bornes d'un générateur en charge est donnée par la formule $U = E - rI$: E est la force électromotrice (f. e. m.) et r la résistance intérieure du générateur.

Pour tous les générateurs industriels (accumulateurs, dynamo) la chute ohmique rI est petite : la tension aux bornes en charge normale diffère peu de la f. e. m.

EXERCICES

1. Trois résistances valant respectivement 2 Ω, 3 Ω et 4 Ω sont branchées en parallèle entre deux points A et B entre lesquels règnent une tension de 12 volts. Calculer le courant dans chacune des résistances, le courant total qui passe de A à B et la résistance équivalente aux trois résistances en parallèle.

Réponses : 6 A; 4 A; 3 A; 13 A; 0,923 Ω.

2. Un courant de 1 A se partage entre trois dérivations qui ont pour résistance 1 Ω, 5 Ω, 12 Ω. Calculer la résistance équivalente, la tension entre les bornes communes aux trois branches, le courant dans chaque branche.

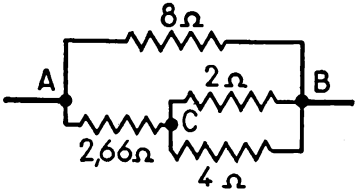


FIG. 13. — Figure pour l'exercice 4.

3. Trois résistances AB, BC, CA de chacune 10 Ω forment un triangle. Calculer la résistance de l'ensemble entre deux sommets du triangle.

4. Un courant de 10 A traverse l'ensemble des résistances de la figure 13. Calculer le courant dans chaque résistance.

5. Calculer les résistances des shunts 1 A, 10 A, 1 000 A à utiliser en dérivation aux bornes d'un milliampèremètre qui dévie de toute son échelle lorsque la tension entre ses bornes est 0,1 V.

Réponses : 0,101 010 Ω; 0,010 010 Ω; 0,000 100 Ω.

6. Une installation d'éclairage comporte 10 lampes qui absorbent chacune 0,55 A. La tension au compteur est 110 V. La ligne du compteur aux lampes est constituée par deux fils de cuivre isolés et accolés. Le diamètre de chacun des fils est 12/10 mm; la longueur de la ligne est de 15 m. Calculer la chute de tension en ligne et exprimez-la en pour-cent de la tension au compteur.

7. En fonctionnement normal une dynamo fournit un courant de 100 A; la tension entre ses bornes étant alors 220 V. Calculer sa f. e. m. sachant que sa résistance interne est 0,2 Ω. Que devient la tension entre les bornes, lorsque le circuit venant à être coupé, la dynamo fonctionne à vide.

N. B. — Pour répondre à cette question on admettra que la f. e. m. est la même à vide et en charge. Plus généralement que le courant qui traverse la dynamo n'a pas d'effet *sur la f. e. m.* Nous verrons, en étudiant les dynamos, qu'il n'en est pas rigoureusement ainsi.

2. PILES ET ACCUMULATEURS

8e LEÇON

Actions chimiques du courant continu. Électrolyse.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie de trois éléments d'accumulateurs.
Un tube en U avec électrodes de charbon (pour Cl_2Cu).
Un voltamètre avec électrodes de charbon (pour SO_4H_2).
Une cuve avec électrodes de cuivre (pour SO_4Cu).
Solutions à 10 % de soude, de chlorure cuivrique, d'acide sulfurique, de sulfate de cuivre.
Un grand verre.
Deux interrupteurs bipolaires.

LEÇON

A. — Étude qualitative [1] de l'électrolyse.

1. Les acides, les bases, les sels en dissolution dans l'eau ou fondus sont des électrolytes.

a) Plongeons les extrémités dénudées de deux fils conducteurs réunis aux bornes d'une batterie d'accumulateurs dans un vase contenant de l'eau pure (fig. 1). Le courant ne passe pas, l'eau pure n'est pas conductrice.

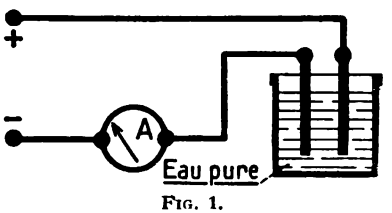


FIG. 1.
L'eau pure ne conduit pas le courant.

b) Versons dans l'eau un peu

1. Dans une étude *qualitative*, il n'est question que de la nature des phénomènes observés, alors que dans une étude *quantitative* on mesure ces phénomènes.

d'une dissolution de soude (HONa) : le courant passe, des bulles de gaz apparaissent sur les extrémités des fils et se dégagent (fig. 2).

Cette décomposition chimique se nomme **électrolyse,** le liquide conducteur et *décomposable* est un **électrolyte**; les extrémités des conducteurs qui plongent dans l'électrolyte sont les **électrodes**; celle par laquelle arrive le courant se nomme **anode,** celle par laquelle il sort, **cathode.**

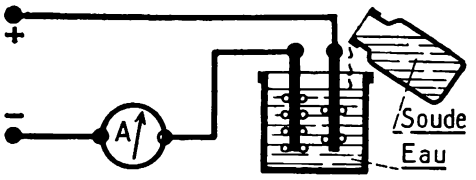


FIG. 2. — On ajoute à l'eau pure de l'eau de soude, goutte à goutte. Dès les premières gouttes, l'ampèremètre dévie : un courant passe.

L'appareil complet est un **électrolyseur,** une cuve ou un bac à électrolyse; quand il permet de mesurer la quantité des corps produits par l'électrolyse ou lui donne le nom de **voltamètre** [1].

c) Au lieu de soude qui est une *base,* nous pourrions employer une solution d'*acide* sulfurique ou de sulfate de cuivre qui est un *sel.* Il est possible aussi d'électrolyser du sel marin (ClNa) fondu dans un creuset chauffé au rouge.

Mais les métaux ou les alliages fondus sont conducteurs sans être décomposables; ce ne sont pas des électrolytes.

Les électrolytes sont donc des acides, des bases, des sels dissous ou fondus.

2. L'électrolyse du chlorure cuivrique dissous est particulièrement simple.

Dans un gros tube en U (fig. 3), nous mettons une dissolution concentrée de chlorure cuivrique (Cl_2Cu) et nous y plongeons comme électrodes deux tiges de charbon [2].

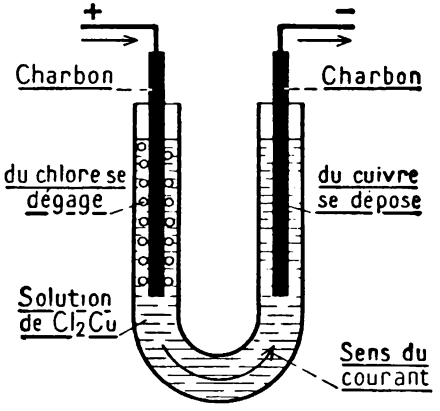


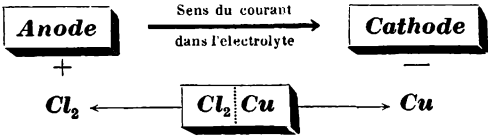
FIG. 3. — **Électrolyse du chlorure cuivrique** en solution dans l'eau.
Du chlore se dégage à l'anode.
Du cuivre se dépose sur la cathode.

1. Ne pas confondre *voltamètre* et *voltmètre.*
2. Le charbon employé dans les appareils électriques, meilleur conducteur que le charbon de bois, était autrefois du charbon des cornues, on se sert à présent d'un mélange de charbon aggloméré par du brai, moulé à la presse et cuit à très haute température (2500°).

Constatez à l'anode un dégagement de chlore, reconnaissable à son odeur, et sur la cathode un dépôt rouge de cuivre.

Rien n'apparaît à l'intérieur même du liquide.

L'électrolyse est résumée par le schéma suivant :



La molécule d'électrolyte est seulement coupée en deux parties que l'on nomme **ions.**

3. La décomposition fondamentale d'un électrolyte est souvent accompagnée de réactions chimiques des ions sur le dissolvant, sur les électrodes ou entre eux.

Nous n'en donnerons que deux exemples.

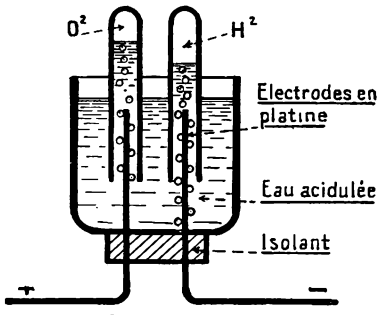


FIG. 4. — **Électrolyse de l'acide sulfurique** dissous dans l'eau avec des électrodes inattaquables (platine ou charbon).

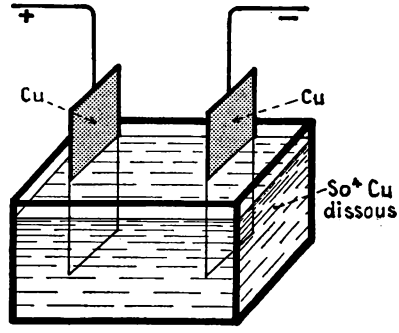


FIG. 5. — **Électrolyse du sulfate de cuivre** dissous dans l'eau avec électrodes en cuivre. L'anode diminue de poids, la cathode augmente d'autant.

*1° **Electrolyse de l'eau acidulée sulfurique avec des électrodes inattaquables.*** La figure 4 représente l'électrolyseur. Les électrodes sont en charbon ou en platine que l'acide sulfurique et les produits de sa décomposition n'attaquent pas.

De l'hydrogène se dégage sur la cathode, de l'oxygène sur l'anode.

C'est l'eau qui est décomposée :

$$2H_2O \longrightarrow 2\uparrow H_2 + \uparrow O_2$$

Mais l'acide sulfurique intervient, les réactions successives sont :

$$SO_4H_2 \longrightarrow SO_4 + H_2\uparrow \quad \textit{(réaction fondamentale).}$$

A l'anode, l'ion SO_4 agit sur le dissolvant :

$$2SO_4 + 2H_2O \longrightarrow 2SO_4H_2 + O_2\uparrow \quad \textit{(réaction secondaire).}$$

2° Electrolyse d'une solution de sulfate de cuivre avec électrodes en cuivre.

Vous observez (fig. 5) un dépôt de cuivre sur la cathode, l'anode se dissout dans l'électrolyte et disparaît peu à peu.

En somme, il y a transport du cuivre de l'anode à la cathode.

Les réactions sont :

$$SO_4Cu \longrightarrow SO_4 + Cu\downarrow \quad \textit{(réaction fondamentale),}$$

$$Cu + SO_4 \longrightarrow SO_4Cu \quad \textit{(réaction secondaire).}$$

4. Applications de l'électrolyse.

a) ***Dorure, argenture, nickelage, cuivrage, chromage.*** Pour protéger certains objets métalliques contre l'oxydation et leur donner en même temps bel aspect, on les recouvre, par électrolyse, d'une couche mince d'un métal précieux ou peu altérable.

Il suffit de placer l'objet comme cathode dans une dissolution d'un sel du métal qu'on veut déposer : ainsi, pour argenter un objet, on le plonge dans une solution de cyanure double d'argent et de potassium que l'on utilise avec l'objet comme cathode.

Des précautions minutieuses sont nécessaires, si l'on veut obtenir un dépôt d'épaisseur uniforme qui adhère bien à l'objet. Il faut, en particulier :

1° que la surface à métalliser soit parfaitement propre;

2° que le bain électrolytique soit à une concentration et à une température convenables;

3° que l'intensité du courant par unité de surface de la cathode (densité de courant) ait une valeur déterminée.

On emploie habituellement, comme anode, une lame du même métal que celui qui se dépose. L'électrolyse a pour résultat le transport du métal de l'anode à la cathode et la concentration du bain reste constante. On dit que l'*anode* est soluble.

Les dépôts d'or, d'argent, de nickel adhèrent mieux sur le cuivre. Le fer et la fonte sont d'abord recouverts d'une couche de cuivre avant d'être dorés, argentés ou nickelés. Le chromage s'effectue après nickelage (fig. 6).

b) ***La galvanoplastie permet de fabriquer des objets métalliques par électrolyse.*** Soit à reproduire en cuivre une face d'une médaille. On en prend une empreinte avec de la gutta-percha. On rend la surface de l'empreinte conduc-

trice en la frottant de plombagine et l'on produit un dépôt de cuivre sur cette surface. Quand le dépôt a une épaisseur suffisante, on le sépare du moule : il reproduit la face de la médaille.

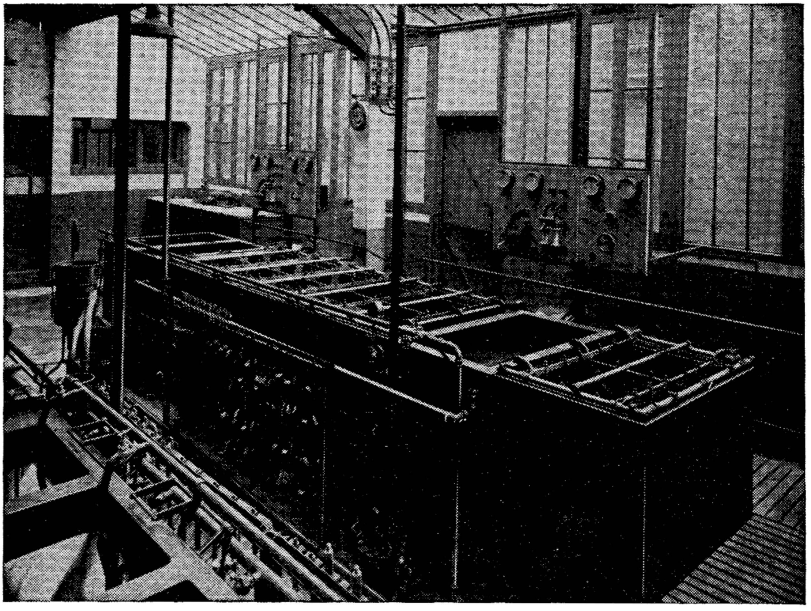


FIG. 6. — **Train de nickelage** pour objets volumineux, tels que chauffe-bains, réservoirs de motocyclette, meubles en tubes, etc...

c) ***Les industries électrochimiques sont variées et très importantes.***

Par exemple, l'électrolyse du chlorure de sodium fournit, suivant les conditions opératoires, du chlore, du sodium, de la soude, de l'eau de Javel, du chlorate de sodium.

L'aluminium est fabriqué par électrolyse de l'alumine (ou oxyde d'aluminium) fondue; le magnésium, par électrolyse du chlorure de magnésium.

C'est aussi par électrolyse que l'on *affine* certains métaux, notamment le cuivre, qui, purifié à 99,9 %, est bien meilleur conducteur du courant électrique que le cuivre métallurgique brut.

B. — Étude quantitative de l'électrolyse.

5. Loi des valences de Faraday[1]

a) On appelle *valence-gramme* d'un corps simple le quotient de sa masse atomique par sa valence. Voici quelques valences-grammes.

CORPS	MASSE ATOMIQUE	VALENCE	VALENCE-GRAMME
Hydrogène ... H	1	1	1 : 1 = 1 g
Argent..... Ag	108	1	108 : 1 = 108 g
Cuivre..... Cu	63	2	63 : 2 = 31,5 g
Or..... Au	197	3	197 : 3 = 65,7 g

b) On monte en série des voltamètres contenant des électrolytes différents : eau acidulée, nitrate d'argent, sulfate de cuivre, chlorure d'or. Le même courant les traverse pendant quelque temps (fig. 7).

On mesure les masses d'hydrogène[2], d'argent, de cuivre, d'or qui ont été déposées et l'on compare ces masses à celles des valences-grammes.

Nature du corps déposé.	Hydrogène	Argent	Cuivre	Or
Masse du corps déposé.	0,015 *g*	1,62 *g*	0,472 *g*	0,985 *g*
Nombre de valences-grammes déposées.	$\frac{0,015}{1} = 0,015$	$\frac{1,62}{108} = 0,015$	$\frac{0,472}{31,5} = 0,015$	$\frac{0,985}{65,7} = 0,015$

On voit qu'on a obtenu, dans chaque voltamètre, 0,015 valence-gramme du corps apparu à la cathode.

D'où la loi des valences de Faraday : **quand le même courant traverse pendant le même temps plusieurs électrolytes différents, il libère le même nombre de valences-grammes de chacun d'eux.**

1. Faraday, illustre savant anglais (1791-1867).
2. On recueille l'hydrogène dans un tube gradué. On mesure son volume. On calcule sa masse, sachant qu'à la pression atmosphérique normale et à la température ordinaire 1 cm^3 d'hydrogène pèse environ 2 : 22,4 *mg*.

c) ***Quantité d'électricité nécessaire pour libérer une valence-gramme.***

On l'a mesurée avec soin en électrolysant une solution de nitrate d'argent. Vous imaginez comment l'on procède.

On fait passer un courant bien constant dans un voltamètre analogue à celui de la figure 8.

1° On mesure l'intensité I du courant avec un ampèremètre précis, soit par exemple $I = 0{,}25$ *ampère*, et, avec un chronomètre, la durée de passage de ce courant, soit $t = 1\,800$ *secondes*.

On a ainsi utilisé :
$0{,}25 \times 1\,800 = 450$ *coulombs*.

2° On pèse avec une balance sensible l'augmentation de masse de la cathode, c'est-à-dire la masse d'argent déposée, soit 0,503 *gramme*.

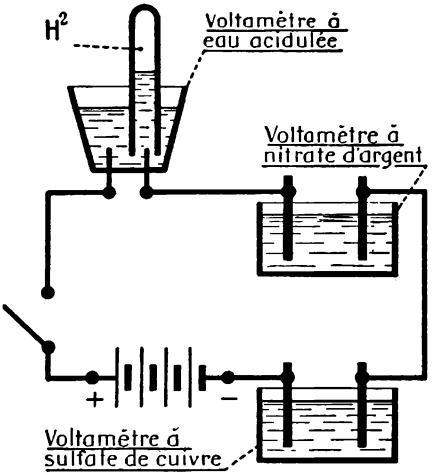


FIG. 7. — **Loi des valences de Faraday. Les voltamètres sont en série et contiennent des électrolytes différents.**

Pour déposer une valence-gramme, il faut donc :

$$\frac{450 \times 108}{0{,}503} = \mathbf{96\,500\ coulombs.}$$

Un ampère fournit un coulomb par seconde, il dépose :

$108 : 96\,600 = 0{,}001\,118$ *gramme* d'argent par seconde.

D'où cette définition *électrochimique* de l'ampère en usage avant la définition *électrodynamique* légale actuellement, donnée dans la 2e leçon

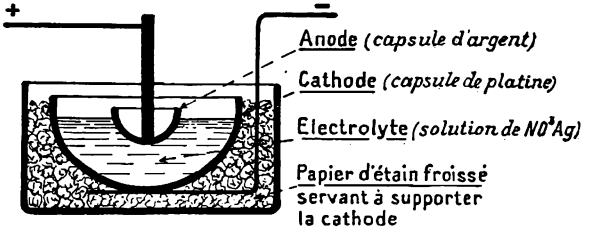


FIG. 8. — **Mesure de la quantité d'électricité nécessaire pour libérer une *valence-gramme* d'argent.**

L'ampère est l'intensité du courant qui dépose par seconde 1,118 *milligramme d'argent d'une solution de nitrate d'argent dans l'eau.*

C. — Généralisation de la loi d'Ohm.

6. Force contre-électromotrice.

a) Un électrolyseur à électrodes de charbon contient de l'eau acidulée sulfurique (fig. 9). Deux interrupteurs bipolaires permettent de le brancher, l'un C sur le générateur, l'autre B sur un voltmètre polarisé.

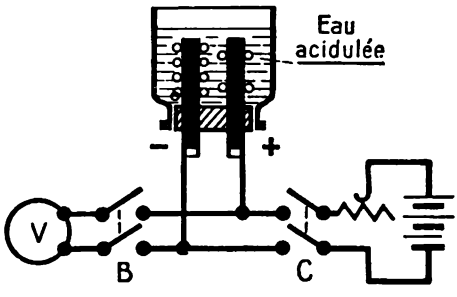


FIG. 9. — Montage pour montrer la force contre-électromotrice d'une cuve à électrolyse.

1° Fermons l'interrupteur B : le voltmètre ne dévie pas. La cuve à électrolyse n'est pas un générateur.

2° Fermons l'interrupteur C. La solution sulfurique s'électrolyse et des bulles de gaz se dégagent sur les deux électrodes. Laissons fonctionner l'appareil pendant quelques minutes. Le voltmètre se stabilise et marque 1,9 *volt.*

3° Coupons le courant en ouvrant C. Le voltmètre tombe immédiatement à 1,5 *volt,* puis baisse ensuite régulièrement et rapidement.

L'électrolyseur est donc devenu un générateur électrique temporaire. Il s'use très vite, mais, dans les instants qui suivent l'ouverture de C, sa force électromotrice produit à travers le voltmètre un courant (faible) qui traverse l'électrolyseur du pôle — au pôle +, soit en sens inverse du courant d'électrolyse pendant la 2e partie de l'expérience. Il est logique d'admettre que cette force électromotrice existait déjà pendant l'électrolyse; elle tendait alors à s'opposer au passage du courant imposé par la force électromotrice de l'accumulateur de trois éléments. C'est pourquoi la f. é. m. de l'électrolyseur est appelée **force contre-électromotrice** pendant l'électrolyse. Sa valeur 1,5 *V* est donnée par la lecture du voltmètre immédiatement après la suppression du courant d'électrolyse, c'est-à-dire immédiatement après l'ouverture de C.

b) En répétant l'expérience avec d'autres électrolyseurs, on constate que la force contre électromotrice *dépend de la nature de l'électrolyte et des électrodes*, mais non de leur grandeur. L'électrolyse produit une différence dans la nature chimique des électrodes : on dit qu'elles se *polarisent*. La f. é. m. provient du fait que les deux électrodes sont alors chimiquement différentes. On comprend ainsi que dans l'électrolyse du sulfate de cuivre avec des électrodes en cuivre la f. é. m. soit nulle : les deux électrodes ne sont pas modifiées par l'électrolyse.

c) Pour que l'électrolyse se produise il est nécessaire d'imposer aux bornes de l'électrolyseur une tension supérieure à la force contre-électromotrice.

7. Généralisation de la loi d'Ohm pour un récepteur.

Tout récepteur dans lequel le passage du courant produit des phénomènes chimiques (électrolyseurs) ou mécaniques (moteurs) possède une force contre-électromotrice. Il possède aussi une résistance intérieure, tout comme un générateur. Soit R la résistance *totale* de la portion de circuit AB (fig. 10) comportant un électrolyseur dont la f. c. é. m. est E′ *volts*. La résistance de l'électrolyte est comprise dans R. Soit U la tension aux bornes de AB. Cette tension impose le courant alors que E′ tente de s'opposer au passage de celui-ci. Finalement c'est la différence U — E′ qui produit le courant I dans la portion de circuit AB.

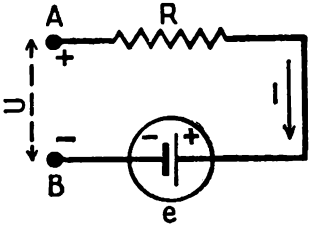


FIG. 10. — La portion de circuit AB comporte résistance et force contre-électromotrice.

D'où U — E′ = RI qui s'écrit :

$$U = E' + RI.$$

La tension aux bornes d'un élément de circuit **récepteur** *est égale à sa force contre-électromotrice* **augmentée** *de la chute ohmique* (RI).

RÉSUMÉ

1. — Les acides, les bases, les sels fondus ou dissous sont des électrolytes.

Leur décomposition en ions est souvent accompagnée de réactions chimiques des produits de la décomposition sur le dissolvant, sur les électrodes ou entre eux. Exemples : électrolyse du chlorure cuivrique, de l'eau acidulée sulfurique, du sulfate de cuivre.

2. — De nombreuses industries électrochimiques fabriquent par électrolyse des métaux ou des produits chimiques. Le cuivrage, le nickelage, le chromage, l'argenture, la dorure et la galvanoplastie sont des applications de l'électrolyse.

3. — Il faut 96 500 coulombs pour libérer une valence-gramme d'un corps produit par électrolyse.
Un courant de 1 ampère dépose en 1 seconde 1,118 mg d'argent d'une solution dans l'eau de nitrate d'argent.

4. — Dans beaucoup d'électrolyses, une f. c. é. m. s'oppose au passage du courant.

5. — La loi d'Ohm sous la forme $U = RI + E'$ s'applique à une portion de circuit contenant un électrolyseur ainsi qu'à tous les récepteurs, aux moteurs en particulier.

EXERCICES

1. Dans les installations à courant continu faites dans des locaux humides, on constate que les conducteurs positifs s'altèrent, se rompent plus souvent que les conducteurs négatifs. L'électrolyse n'explique-t-elle pas ces ruptures?

2. On soude à l'étain le fer, le fer-blanc, le laiton et le cuivre en se servant comme décapants de chlorure de zinc et de chlorure d'ammonium (sel ammoniac). Ces décapants sont proscrits quand il s'agit de souder des conducteurs électriques. Pourquoi?

3. Un litre d'hydrogène, sous la pression atmosphérique et à la température ordinaire, pèse environ (2 : 22,4) *g*. Quel courant faut-il employer pour produire, en 1 *heure*, 1 m^3 d'hydrogène en électrolysant une solution de soude?

Réponse : 2 330 *ampères.*

4. Un courant de 10 *A* passe pendant une heure dans une cuve à argenture. Quelle est la masse d'argent déposée?

Réponse : 40,25 *grammes.*

5. Combien faut-il d'ampères-heures pour affiner une tonne de cuivre? (Chercher dans le texte de la leçon les données nécessaires pour répondre à la question.)

Réponse : $4{,}25 . 10^5$ *ampèreheures.*

6. Le courant au cours de l'électrolyse de l'expérience du paragraphe 6 est 2 ampères. Calculer la résistance interne de l'électrolyseur.

7. Un moteur dont la résistance interne est 1,2 Ω absorbe 10 ampères; la tension à ses bornes est 120 *volts*. Calculer sa force contre-électromotrice.

ÉLECTROLYSEURS

a) ***Appareils pour dépôts métalliques.***

1° *Tubes en U.* C'est l'appareil utilisé dans le paragraphe 2 de la leçon. Se procurer un tube de grandes dimensions. Les électrodes sont des tiges de charbon, ou des tiges métalliques.

2° *Cuves en verre.* — Les bacs en verre d'accumulateurs conviennent bien. Les électrodes sont des plaques rectangulaires de métal, percées dans le haut de deux trous où passent des baguettes de verre qui sont posées sur le bord du bac (fig. 11).

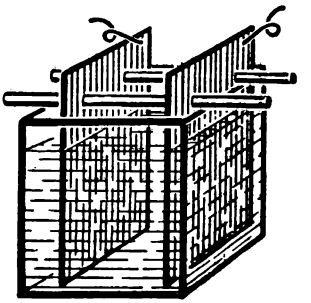


FIG. 11. — Bac pour l'électrolyse du sulfate de cuivre.

b) ***Appareils pour dégagements gazeux.***

1° *Électrolyse de l'eau de soude.* — Les électrodes sont en fer ou en nickel.

Les gaz sont recueillis dans des éprouvettes graduées ou non (fig. 12).

2° *Électrolyse de l'eau acidulée sulfurique.* — Les électrodes doivent être inattaquables. A défaut de fils de platine, on emploie des tiges de charbon prises, par exemple, à une pile usée de lampe de poche.

Le vase est un bocal en verre à large col dont on a enlevé le fond (fig. 13).

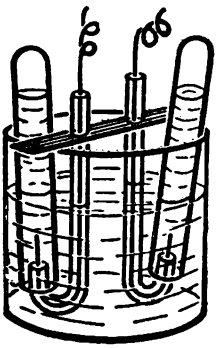


FIG. 12. — Appareil pour l'électrolyse de l'eau de soude.

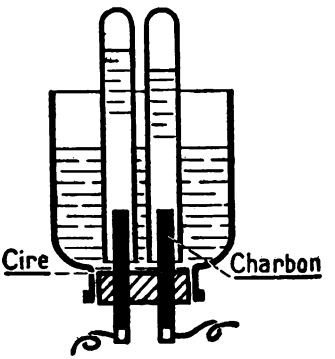


FIG. 13. — Appareil pour l'électrolyse de l'eau acidulée sulfurique.

Piles électriques.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une pile Leclanché à vase poreux
Sel ammoniac (chlorure d ammonium $ClNH_4$);
Un bâ on de zinc.
Un rhéostat de 5 ohms.
Un ampèremètre calibre : 1 A).
Un voltmètre (calibre : 3 V).
Differents modèles de piles genre Leclanché, même hors service.

LEÇON

Les piles ont été les seuls générateurs de courant continu employés de 1800 à 1870, avant l'invention des dynamos. De très nombreux modèles ont été imaginés qui ne servent plus. La pile Leclanché et ses quelques modifications sont les seules qui soient encore fréquemment utilisées.

A. — Élément Leclanché.

1. Examinons un élément Leclanché à vase poreux.

Les deux électrodes sont différentes : l'une est une plaque de charbon placée dans un vase cylindrique de porcelaine poreuse au milieu d'un mélange de bioxyde de manganèse et de charbon [1] en petits morceaux. L'autre est un bâton de zinc.

Vase poreux et zinc sont plongés dans une solution concentrée de chlorure d'ammonium (200 *g* par litre), contenue dans un vase carré en verre ; le goulot cylindrique est élargi dans un angle du vase pour loger le bâton de zinc (fig. 1).

1. Le bioxyde de manganèse employé seul est mauvais conducteur.

2. Le charbon est le pôle positif, le zinc le pôle négatif.

Repérons les pôles avec un voltmètre polarisé.

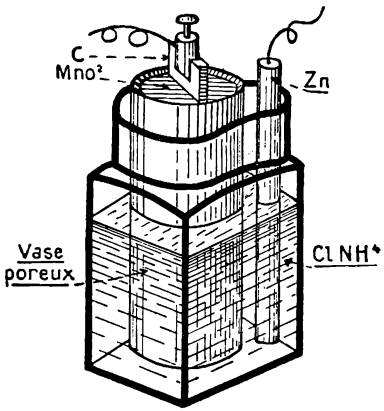


FIG. 1. — **Pile Leclanché à vase poreux.**

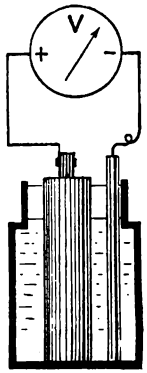


FIG. 2. — Le charbon est le **pôle positif**; le zinc, le **pôle négatif.**

Vous constatez que le pôle positif de l'élément est le charbon et le pôle négatif le zinc (fig. 2).

3. Force électromotrice et résistance intérieure de l'élément Leclanché.

Les expériences effectuées au cours de la 7e leçon (paragraphe 8) nous ont permis de mesurer la force électromotrice et la résistance intérieure d'un élément Leclanché, suivant le montage de la figure 3.

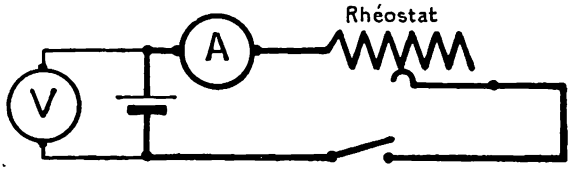


FIG. 3. — **Montage d'une pile Leclanché** débitant dans un rhéostat.

Nous avons trouvé : E = 1,5 *volt* et r = 2 *ohms*.

En charge, quand le courant débité est I = 0,25 *ampère*, la tension entre les bornes est U = 1 *volt*; pour I′ = 0,6 *ampère*, U′ = 0,3 *volt*.

Nous savons que cette diminution de la tension aux bornes est dûe à la résistance interne de l'élément, selon la formule U = E — RI.

A l'intérieur de la pile, le courant va du zinc au charbon, il traverse la solution de chlorure d'ammonium dont la section est réduite dans les pores du vase poreux. C'est la cause de la résistance notable de cette pile.

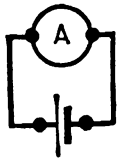


FIG. 4. — Estimation de la **résistance intérieure** d'un élément de pile. L'élément est court-circuité par un ampèremètre. Il ne faut pas tenter une telle mesure avec un élément d'accumulateur. Pourquoi?

Nous pouvons mesurer grossièrement cette résistance par l'expérience suivante. Réunissons les bornes de la pile par des fils courts à l'ampèremètre[1] (fig. 4). Le courant indiqué par l'ampèremètre est 0,75 *ampère*. Comme les bornes de la pile sont réunies par des conducteurs dont la résistance est très faible, on dit que l'élément est en *court-circuit*. La tension entre ses bornes est alors pratiquement nulle, car elle est le produit du courant par la très petite résistance du court-circuit.

Appliquons à cette expérience la formule générale U = E — RI; elle devient ici puisque U = 0 E = RI. D'où :

$$R = E : I = 1{,}5 : 0{,}75 = 2 \text{ ohms}.$$

Remarques. — 1° L'expérience montre que la résistance interne dépend des dimensions de l'élément, au contraire tous les éléments Leclanché ont la même f. é. m.

2° Il ne faut pas tenter cette expérience avec un accumulateur. Sa résistance interne est très faible, le courant de court-circuit très grand, le détériorerait rapidement. Il en est de même pour tous les générateurs industriels.

4. Les diverses formes de la loi d'Ohm.

Successivement nous avons vu que la tension aux bornes d'une portion de circuit était donné par :

(1) $U = RI$ pour une *résistance morte*;

(2) $U = E' + RI$ pour un *récepteur*;

(3) $U = E - RI$ pour un *générateur*.

Ce sont diverses formes de la loi d'Ohm.

---

1. La durée de débit doit être très courte et les lectures rapides pour que la polarisation qui sera étudiée plus loin n'ait qu'une influence négligeable.

Remarquons que la formule (1) n'est que le cas particulier $E' = 0$ de la formule (2).

5. Loi d'Ohm pour un circuit fermé.

Un générateur (f. é. m. E et résistance interne *r*) débite dans une résistance morte R (fig. 5 *a*).

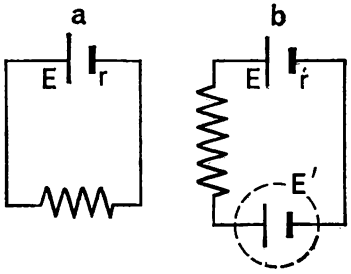


FIG. 5. — Lois d'Ohm pour un circuit fermé,

La tension entre ses bornes est donnée par la formule (3) $U = E - rI$, or ces bornes sont aussi celles de la résistance donc la même tension $U = RI$ d'après la formule (1). D'où :

$$E - rI = RI \qquad E = RI + rI$$

$$\boldsymbol{E = (R + r)I}$$

et $$\boldsymbol{I = E : (R + r)}$$

$R + r$ est la **résistance totale** du circuit.

Le courant dans le circuit est égal au quotient de la force électromotrice par la résistance totale du circuit.

Lorsque le même générateur débite (fig. 5 *b*) sur une portion de circuit de résistance R et comprenant un récepteur de f. c. é. m. E'. La tension U est donnée par les formules (2) et (3) :

$$\boldsymbol{E' + RI = E - rI}$$

d'où $$\boldsymbol{E - E' = (R + r)I}$$

Application numérique.

Un élément Leclanché dont la f. é. m. est $E = 1{,}5$ *V* et la résistance intérieure $r = 2\,\Omega$ fournit dans une résistance extérieure $R = 3\,\Omega$ un courant I égal à

$$1{,}5 : (3 + 2) = 0{,}3 \text{ ampère.}$$

La tension à ses bornes quand il débite ce courant est :

$$U = 3 \times 0{,}3 = 0{,}9 \text{ volt.}$$

6. Quand un élément Leclanché débite un courant pendant quelque temps, il se polarise.

Reprenons le montage du paragraphe 3. Réglons le rhéostat pour que le courant débité par l'élément soit assez intense, par exemple de l'ordre de 0,60 *ampère.*

Après quelques minutes de fonctionnement, vous constatez que l'intensité du courant diminue graduellement. Mesurons la f. é. m. de l'élément, en coupant le circuit extérieur pendant la lecture du voltmètre : la f. é. m. est devenue plus faible. *On dit que l'élément s'est* **polarisé.**

En le laissant au repos, c'est-à-dire en ouvrant le circuit extérieur, la f. é. m. remonte peu à peu : *l'élément se* **dépolarise.**

Les réactions chimiques qui se produisent dans l'élément expliquent sa **polarisation**[1] et sa **dépolarisation.**

7. Théorie de l'élément Leclanché.

Le courant qui traverse l'élément en fonctionnement va du zinc au charbon. Il électrolyse le chlorure d'ammonium :

$$2\,ClNH_4 \longrightarrow Cl_2 + 2\,NH_4.$$

Le chlore se porte sur le zinc et forme du chlorure de zinc qui se dissout :

$$Zn + Cl_2 \longrightarrow Cl_2\,Zn$$

Le radical ammonium NH_4 donne de l'ammoniac et de l'hydrogène :

$$2\,NH_4 \longrightarrow 2\,NH_3 + H_2\uparrow$$

L'ammoniac se dissout dans le liquide.

L'hydrogène, en bulles très fines, s'accroche au charbon et au bioxyde de manganèse et ne se dégage pas complètement. C'est cette couche

1. Le mot polarisation n'a pas ici le sens dans lequel nous l'avons employé antérieurement.

d'hydrogène qui diminue la f. é. m. et réduit le courant, c'est-à-dire *polarise* l'élément.

Le bioxyde de manganèse est un oxydant; il fait disparaître l'hydrogène en l'oxydant pour former de l'eau : c'est le phénomène de *dépolarisation.*

$$2\,O_2Mn + H_2 \longrightarrow O_3Mn_2 + H_2O$$

Mais le bioxyde de manganèse est un solide : c'est un oxydant peu actif, la dépolarisation est lente; pour qu'elle ait le temps de s'effectuer, il faut laisser reposer l'élément.

En somme, en fonctionnant, l'élément Leclanché consomme du zinc et du chlorure d'ammonium.

8. Capacité d'un élément Leclanché.

Cette capacité s'exprime par la quantité d'électricité que l'élément peut fournir avant que, soit le chlorure d'ammonium, soit le zinc qu'il contient, ne soient usés.

Elle est plus grande pour un gros élément que pour un petit.

La capacité d'un élément Leclanché à vase poreux est de l'ordre de 30 à 90 *ampères-heures* suivant la taille.

9. L'élément Leclanché a été perfectionné.

On a cherché à réduire sa résistance intérieure et à le rendre transportable.

a) Pour diminuer la résistance intérieure, on a supprimé le vase poreux.

1° Pile à agglomérés. Deux briquettes d'un mélange de bioxyde de manganèse et de graphite sont appliquées sur les deux faces de la lame de charbon positive. La résistance intérieure n'est plus que 0,5 *ohm* environ (fig. 6).

2° Pile à sac. Le vase poreux est remplacé par un sac en toile. Le pôle négatif est une feuille de zinc enroulée autour du sac (fig. 7). La résistance intérieure est de l'ordre de 0,1 *ohm*, la capacité de 180 à 200 *ampères-heures.*

b) Pour immobiliser le liquide, on y mélange à chaud de la gélose ou de la fécule. En refroidissant, il se prend en gelée. On obtient ainsi une **pile sèche** ou plutôt humide.

Les piles sèches sont du type à sac, le zinc sert de vase pour contenir le liquide immobilisé et le charbon entouré de dépolarisant.

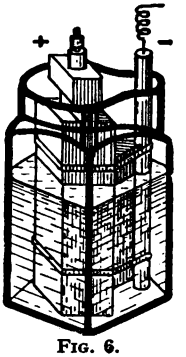


FIG. 6.
Pile à agglomérés.

Vous connaissez les petites piles sèches de trois éléments (fig. 8) des lampes de poche.

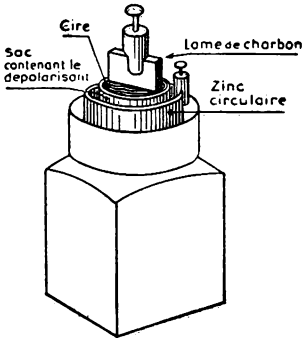


FIG. 7. — **Pile à sac.**

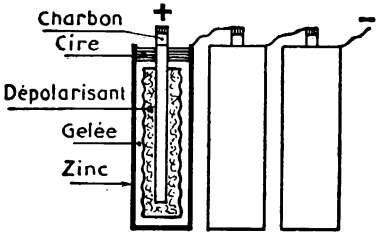


FIG. 8. — **Batterie de trois éléments secs** pour lampe de poche. Les éléments sont séparés les uns des autres par du carton.

c) Dans les piles à air, telles que la **pile Féry** (fig. 9), le bioxyde de manganèse est supprimé. Le pôle positif est un charbon très poreux qui absorbe de l'oxygène de l'air. Le pôle négatif est une plaque de zinc placée horizontalement au fond du vase. L'hydrogène, formé dans l'attaque du zinc par le chlorure d'ammonium quand la pile débite, pénètre dans le charbon et l'oxygène l'oxyde. La f. é. m. d'un élément Féry est 1,26 *volt*.

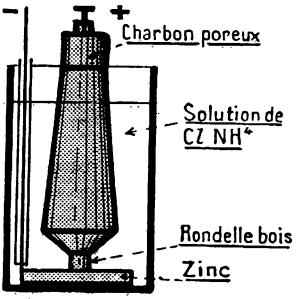


FIG. 9. — **Élément Féry.** C'est l'air qui sert de dépolarisant.

10. Entretien des éléments Leclanché.

a) Un élément Leclanché s'use lentement à vide. Le zinc, parce qu'il n'est jamais pur, est attaqué par le chlorure d'ammonium, même quand l'élément ne débite pas. On ralentit cette attaque en amalgamant le zinc, soit en y ajoutant un peu de mercure quand le métal est fondu pour être coulé, soit en le frottant avec du mercure dans de l'eau acidulée sulfurique.

b) Dans les éléments à liquide libre, on ajoute de temps en temps un peu d'eau pour remplacer celle qui s'est évaporée et l'on renouvelle chaque année la solution de sel ammoniac (200 *g* par litre).

c) Des réactions secondaires dans le liquide de l'élément produisent de l'oxychlorure de zinc qui se dépose en une couche blanche très adhérente sur le zinc

et le vase poreux et augmente la résistance intérieure. On gratte cet oxychlorure avec un couteau.

Enfin, il faut débarrasser le haut du vase de verre des sels grimpants qui s'y forment et remplacer la couche de paraffine qui recouvre le col. Cette paraffine s'oppose à la progression des sels grimpants parce qu'elle n'est pas mouillée par l'électrolyte. Une couche de peinture laquée produit le même effet.

d) Les piles sèches n'ont besoin d'aucun entretien : on les remplace quand elles sont usées.

B. — Couplage des éléments de pile.

En groupant de manière convenable un nombre suffisant d'éléments de pile, on obtient, soit une f. é. m. élevée, soit une grande intensité.

11. Couplage en série.

Soient n éléments de f. é. m. E, de résistance intérieure r. Réunissons par un fil conducteur le pôle négatif du premier élément au pôle positif du second, le pôle négatif du second au pôle positif du troisième et ainsi de suite. Par ce *couplage en série*, nous formons une *batterie* de n éléments qui fournit un courant I dans une résistance extérieure R (fig. 10).

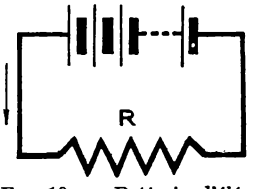


FIG. 10. — Batterie d'éléments montés en série.

Nous constatons avec un voltmètre que la f. é. m. de 2 éléments est $2E$, de 3 éléments $3E$,...de n éléments nE.

Le courant I fourni par la batterie traverse successivement tous les éléments, dont toutes les résistances intérieures s'ajoutent et la résistance intérieure de la batterie est nr.

L'intensité du courant dans le circuit extérieur est :

$$I = \frac{nE}{R + nr}.$$

12. Couplage en parallèle.

Tous les pôles positifs sont réunis par un fil métallique qui est le pôle positif de la batterie; tous les pôles négatifs sont réunis par un fil métallique qui est le pôle négatif (fig. 11).

Supposons que tous les éléments aient la même f. é. m. E et la même résistance intérieure r.

La f. é. m. de la batterie est celle d'un élément, soit E. Nous le vérifions avec un voltmètre.

Les n résistances intérieures des éléments sont en parallèle, la résistance équivalente est $r:n$.

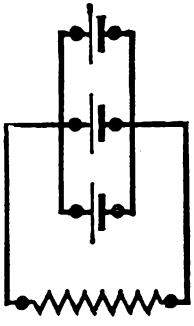


Fig. 11. — Batterie d'éléments montés en parallèle.

Dans une résistance extérieure R, la batterie débite donc une intensité

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$

Exemples numériques. — 1. 10 *éléments Leclanché ont chacun une f. é. m. de* 1,5 *volt et une résistance intérieure de* 2 *ohms. Quelle est l'intensité fournie dans une résistance extérieure de* 50 *ohms quand les éléments sont couplés d'abord en série, ensuite en parallèle?*

a) Couplage en série :

$$I = \frac{15}{50 + 20} = 0{,}21 \text{ } \textit{ampère.}$$

b) Couplage en parallèle : $I = \frac{1{,}5}{50 + 0{,}2} = 0{,}03$ *ampère.*

2. *Même question pour une résistance extérieure de* 0,1 *ohm.*

a) Couplage en série : $I = \frac{15}{0{,}1 + 20} = 0{,}74$ *ampère.*

b) Couplage en parallèle : $I = \frac{1{,}5}{0{,}1 + 0{,}2} = 5$ *ampères.*

La comparaison des résultats montre que le couplage en série convient quand la résistance extérieure est grande et que le couplage en parallèle est préférable quand la résistance extérieure est petite.

13. Couplage mixte.

Soit 8 éléments Leclanché de f. é. m. 1,5 *volt* et de résistance intérieure 0,6 *ohm.*

On forme 2 séries de chacune 4 éléments (fig. 12). La f. é. m. de chaque série est $1{,}5 \times 4 = 6$ *volts* et la résistance intérieure $0{,}6 \times 4 = 2{,}4$ *ohms.*

On couple les deux séries en parallèle. La batterie obtenue par ce *couplage mixte* a une f. é. m. de 6 *volts* et une résistance intérieure de $2{,}4 : 2 = 1{,}2$ *ohm.*

Dans une résistance extérieure $R = 1{,}8$ *ohm*, elle produit un courant

$$I = 6 : (1{,}8 + 1{,}2) = 2 \text{ ampères.}$$

Le couplage en série est le seul qui soit pratiquement employé. Des éléments couplés en série peuvent être différents les uns des autres sans inconvénients : leurs f. é. m. s'ajoutent et leurs résistances intérieures aussi.

Par contre, les deux autres modes de couplage exigent que les éléments ou les groupes d'éléments unis en parallèle aient des f. é. m. égales, sinon des courants de circulation s'établissent à l intérieur de la batterie et l'usent sans qu'elle débite à l'extérieur.

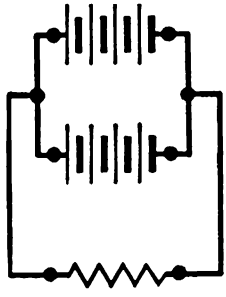


FIG. 12. — **Couplage mixte de huit éléments.**

RÉSUMÉ

1. — Un élément de pile Leclanché à vase poreux se compose d'une plaque de charbon qui est le pôle positif, entourée de bioxyde de manganèse dans un vase poreux et d'un bâton de zinc qui est le pôle négatif; ces deux électrodes plongent dans une solution de chlorure d'ammonium.

Un tel élément possède une *force électromotrice*, E, de 1,5 *volts*, sa résistance intérieure, r, est de l'ordre de 2 *ohms*.

2. — Dans une résistance extérieure R reliant ses deux bornes, l'élément débite un courant d'intensité $I = \dfrac{E}{R + r}$.

3. — Quand un élément Leclanché débite un courant relativement intense pendant quelques minutes, il se polarise; il se dépolarise lentement à circuit ouvert.

4. — Les éléments de piles se couplent soit en série, soit en parallèle, soit en séries-parallèles.

5. — Les piles Leclanché sont employées pour fournir, par intermittence, un courant de peu de durée et de faible intensité.

EXERCICES

1. Les trois éléments d'une pile de lampe de poche sont isolés les uns des autres par une bande de carton qui enserre l'élément du milieu. Cet isolement est-il nécessaire?

2. Une pile formée de 8 éléments identiques en série débite un courant de 0,75 A dans un circuit extérieur de 10Ω. La résistance intérieure de la batterie est 6Ω.

On demande :
1° la f. é. m. de la pile;
2° la f. é. m. et la résistance intérieure d'un élément.

Réponses : 12 *volts*, 1,5 *volt*, 0,75 *ohm*.

3. Le zinc d'un élément de pile pèse 90 *g*. S'il était employé tout entier à la production du courant, quelle serait la capacité de l'élément (en *Ah*)? Le zinc est bivalent et sa masse atomique est 65.

Réponse : 74 *ampèreheures*.

4. La capacité d'un certain élément de pile est 60 *Ah*. Quelle est la capacité d'une batterie formée de
1° 4 éléments semblables en série?
2° 4 éléments semblables en parallèle?

Réponses : 60 *Ah*; 240 *Ah*.

5. Une sonnerie électrique a une résistance de 5Ω. Pour qu'elle fonctionne bien, il faut lui fournir 0,5 *A*. La ligne qui la relie à la pile est faite de 50 *m* de fil de cuivre de 9/10 *mm* de diamètre. On dispose d'éléments Leclanché dont la f. é. m. est 1,5 *V* et la résistance intérieure 0,8Ω.
Combien faut-il monter d'éléments en série pour obtenir un bon fonctionnement de l'installation?

Réponse : 3 *éléments*.

6. Une pile à sac dont la f. é. m. est 1,5 *V*, mise en court-circuit sur un ampèremètre de résistance négligeable, donne un « coup de fouet » de 12 *A*. Quelle est la résistance intérieure de la pile?

Réponse : 0,125 *ohm*.

7. Dans une résistance extérieure de 1Ω, un élément de pile fournit un courant de 1 *A*. Si la résistance extérieure est portée à 2Ω, l'intensité devient 0,6 *A*. Calculer la f. é. m. et la résistance intérieure de l'élément.

Réponse : 1,5 *volt*, 0,5 *ohm*.

Élément d'accumulateur au plomb.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un élément d'accumulateur à plaques visibles:
plaques positives;
plaques négatives.
Un voltmètre 0-3 volts.
Un ampèremètre 0-10 ampères.
Un rhéostat.
Une pipette avec aréomètre Baumé pour accumulateurs.

LEÇON

A. — Description et fonctionnement d'un élément d'accumulateur.

1. Examinons un élément d'accumulateur au plomb (fabrication Tudor).

Il se compose de plaques de plomb disposées verticalement dans un vase en verre, rempli d'acide sulfurique étendu d'eau.

Les plaques, alternativement *négatives* et *positives* (fig. 1 et 2), reposent par des talons sur les bords du vase. Les plaques extrêmes sont négatives. Les plaques de même nom sont soudées à une barre de connexion pour former un groupe négatif et un groupe positif. Chaque plaque est maintenue à 8 ou 10 millimètres de sa voisine par un cadre ou *séparateur* en bois.

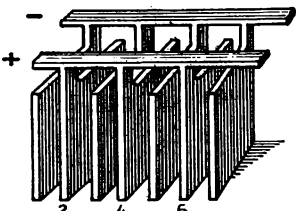


FIG. 1. — Dans le même bac, les plaques positives 2, 4, 6, sont couplées en parallèle il en est de même des plaques négatives 1, 3, 5, 7.
Chaque plaque positive est placée entre deux plaques négatives.

a) ***Plaques positives.*** Elles sont en plomb pur, d'une seule pièce. Sur chaque face, de petites lames verticales très nombreuses en augmentent la surface (fig. 3).

Elles sont couvertes d'une couche mince et poreuse d'oxyde de plomb très oxygéné, O_2Pb, qui s'est formée peu à peu pendant le fonctionnement de l'élément. Cette couche, d'une couleur brun-rouge, est *la matière active positive.*

Parce que la matière active est produite par l'oxydation du plomb

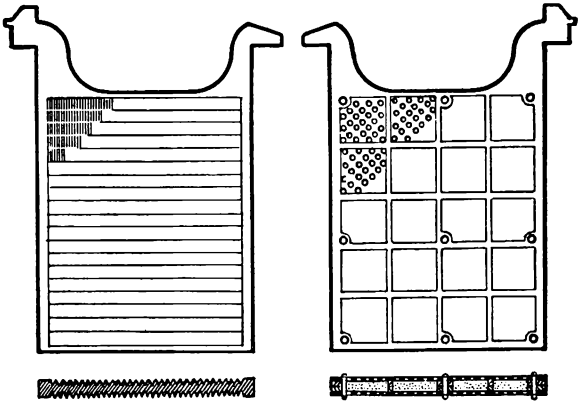


FIG. 2. — La plaque de gauche est une **plaque positive**; celle de droite, une **plaque négative.**

constituant les plaques, on dit que ce type de plaques est de **formation autogène** ou **formation Planté** [1].

b) ***Plaques négatives.*** Chaque plaque négative est formée de deux grilles à larges mailles en plomb allié à de l'antimoine pour le durcir, coulées chacune sur un voile de plomb pur percé de petits trous. Les mailles sont remplies de *la matière active négative* qui est, dans un élément ayant fonctionné, du plomb pur spongieux bleu-ardoise. Les deux grilles sont rivées l'une contre l'autre et la matière active est ainsi enfermée dans de petites caisses perforées qui l'empêchent de tomber.

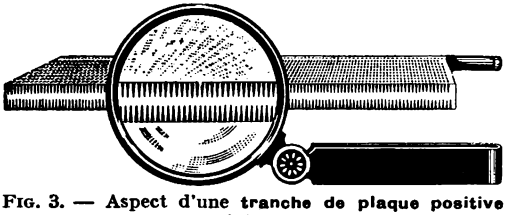


FIG. 3. — Aspect d'une **tranche de plaque positive** vue à la loupe.

1. Du nom de l'inventeur des accumulateurs au plomb *Gaston Planté*, **né en 1834**, mort **en 1889. Le premier accumulateur fut fabriqué en 1860.**

Ces plaques sont fabriquées en remplissant les grilles avec une pâte d'oxydes de plomb, surtout de la litharge, OPb, et d'acide sulfurique étendu. Dès la mise en service de l'élément, ces oxydes sont réduits en plomb pur.

On dit que les plaques à matière active rapportée sont de **formation hétérogène** ou **formation Faure.**

c) ***Electrolyte.*** Le liquide couvrant les plaques est de l'eau distillée additionnée d'acide sulfurique très pur (6 volumes d'eau, 1 d'acide à 60° Baumé).

L'acide sulfurique pour accumulateurs est fabriqué avec du soufre et non avec des pyrites pour qu'il ne contienne aucune trace de fer.

d) ***Bac.*** Les bacs sont en verre pour les éléments à poste fixe de petite et moyenne grandeur. Pour les gros, on emploie le bois doublé de plomb. Pour les éléments transportables, on préfère des bacs en matière isolante noire, moulée, moins lourds et moins fragiles.

Vous remarquerez que les plaques ne descendent pas jusqu'au fond des vases pour que les matières actives qui tombent parfois ne les court-circuitent pas.

e) La construction des plaques diffère un peu selon les fabricants. Certains font des plaques positives à matière active rapportée pour qu'elles soient plus légères. Le résultat final est toujours le même, on obtient une pile dont la constitution est

$$\overset{-}{Pb} \mid SO_4H_2 \mid O_2\overset{+}{Pb}$$

2. Décharge d'un élément d'accumulateur.

Faisons débiter l'élément dans un rhéostat en intercalant un ampèremètre et un interrupteur dans le circuit et en plaçant un voltmètre aux bornes de l'élément (fig. 4). L'intensité est maintenue constante à raison d'environ un ampère par kilogramme de plaques.

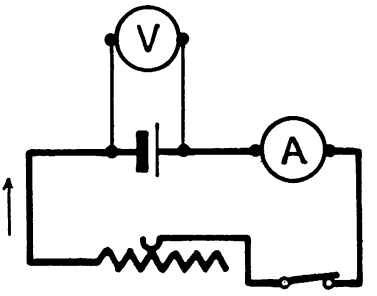


FIG. 4. — **L'élément se décharge.** La flèche indique le sens du courant. Quel est ce sens à l'extérieur de l'élément ? A l'intérieur ?

a) ***Variations de la f. é. m.*** Nous notons les indications du voltmètre de quart d'heure en quart d'heure en coupant le courant pendant la lecture de l'instrument. Les résultats obtenus sont résumés par la courbe figure 5.

La f. é. m. baisse très vite pendant les premières minutes de la décharge,

puis se maintient longtemps entre 1,95 *volt* et 1,85 *volt;* sa diminution

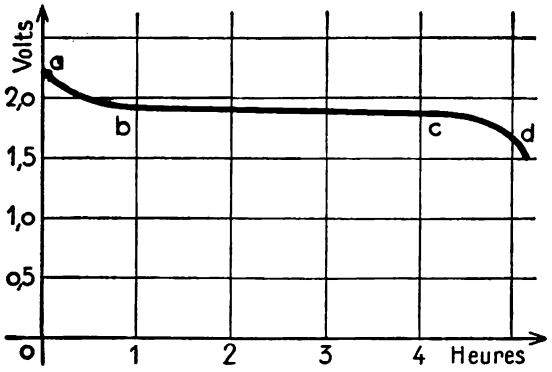


FIG. 5. — Variations de la f. é. m. d'un élément d'accumulateur pendant la décharge. Décrivez ces variations.

devient ensuite plus rapide. Nous arrêtons la décharge quand la f. é. m. atteint 1,80 *volt.*

b) ***Variations de la densité de l'électrolyte.*** Nous repérons cette densité avec un petit aréomètre Baumé contenu dans une pipette. Une poire en caoutchouc permet de faire une prise d'électrolyte suffisante pour que l'aréomètre flotte (fig. 6).

L'aréomètre Baumé indique 24°B quand la décharge commence. La densité du liquide baisse régulièrement pendant la décharge et l'appareil indique 20° B à la fin.

De l'acide sulfurique disparaît donc pendant la décharge.

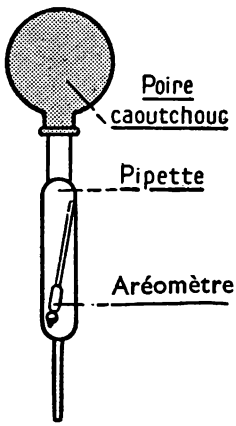


FIG. 6. — Pipette contenant un aréomètre Baumé.

c) ***Couleur des plaques.*** Les positives passent du brun foncé au brun clair; les négatives, qui étaient bleu-ardoise, blanchissent un peu.

d) ***Indice de fin de décharge.*** Le meilleur est la f. é. m. *Un élément d'accumulateur est déchargé quand sa f. é. m. est* 1,8 *volt.*

Toutefois quand un élément déchargé est laissé au repos, sa f. é. m. remonte lentement jusqu'à 2 *volts* environ. Il faut le faire débiter normalement pendant quelques minutes avant de mesurer sa f. é. m.

Un élément déchargé doit être rechargé dans la journée, sinon l'acide sulfurique attaque les matières actives, surtout la négative, en formant une couche dure de sulfate de plomb; l'élément est détérioré, on dit qu'il est *sulfaté.*

3. Charge d'un élément d'accumulateur.

Une source de courant continu est branchée aux bornes de l'élément de manière que le courant arrive à la borne positive et sorte par l'autre borne. Un rhéostat de réglage, un ampèremètre, un interrupteur sont placés dans le circuit, un voltmètre est monté aux bornes de l'élément (fig. 7). L'intensité de charge est maintenue constante à raison de un ou deux *ampères* par kilogramme de plaques.

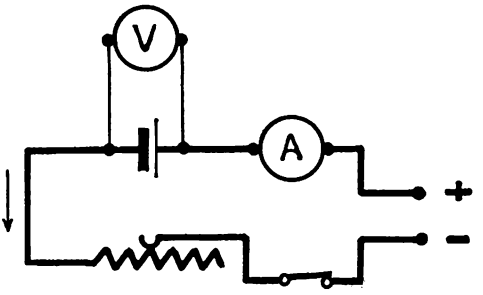


FIG. 7. — **L'élément se charge.** Le courant entre par la borne positive et sort par la négative.

Pendant la charge, bien que l'électrolyte soit traversé par le courant, le dégagement de bulles de gaz sur les électrodes est insignifiant. Il devient abondant quand la charge est terminée.

a) ***Variations de la f. é. m.*** Elle croît d'abord très vite, de 1,8 *volt* à 2,1 *volts*, puis lentement jusqu'à 2,2 *volts* et enfin rapidement jusqu'à 2,6 *volts* (fig. 8). L'électrolyte alors bouillonne, de grosses bulles d'hydrogène et d'oxygène se dégagent, la charge est terminée. Il convient de ne pas la prolonger, car les bulles de gaz en se formant sur le plomb des plaques risquent de désagréger les matières actives.

b) ***Variations de la densité de l'électrolyte.*** La densité croît pendant la charge. L'électrolyte passe de 20° B à 24° B. De l'acide sulfurique se forme dans le liquide.

c) ***Couleur des plaques.*** Les plaques positives sont devenues brun-rouge, les négatives bleu-ardoise. La matière active positive s'est gonflée, elle a foisonné.

d) ***Indices de fin de charge.*** La fin de la charge est indiquée pratiquement :

1° par le dégagement gazeux abondant sur les plaques positives et négatives;

2° *par la f. é. m. de l'élément*, 2,6 volts.

La f. é. m. d'un élément chargé laissé au repos descend assez vite à 2,2 *volts*.

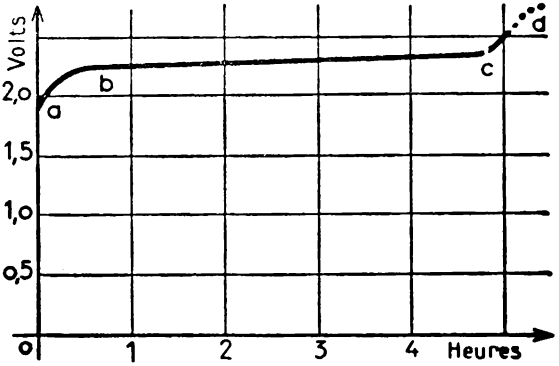


FIG. 8. — Variations de la f. é. m. d'un élément d'accumulateur pendant la charge. Décrivez ces variations.

4. Capacité et résistance intérieure d'un élément. Rendement en quantité.

On mesure la **capacité** d'un élément avec un compteur ampère-heure-mètre monté sur le circuit de décharge. On rapporte cette capacité au kilogramme de plaques.

Elle dépend du régime de décharge. Par exemple, pour un certain élément, elle est de 3,5 *ampères-heures* par kilogramme de plaques dans le cas d'une décharge en 4 *heures*, et de 5 *ampères-heures* par kilogramme dans le cas d'une décharge en 10 *heures*.

Elle varie suivant les types d'éléments. Ainsi elle n'est que 5 *ampères-heures* par kilogramme pour les gros éléments fixes, que l'on fait lourds pour qu'ils soient robustes, alors qu'elle atteint 12 *ampères-heures* par kilogramme pour certains éléments transportables.

On peut mesurer aussi la quantité d'électricité qu'absorbe un élément pour se charger. Elle est plus grande que celle que l'élément restitue quand il se décharge. Le rapport

$$\frac{\text{ampères-heures à la décharge}}{\text{ampères-heures à la charge}}$$

est le *rendement en quantité*. Il est compris entre 0,90 et 0,95.

Les plaques ont une grande surface, elles sont très rapprochées les unes des autres, l'eau sulfurique est concentrée en acide, aussi la *résistance intérieure* d'un élément est-elle très faible. Elle est due surtout à la matière active. Elle est de l'ordre de 0,1 *ohm* par décimètre carré de surface des plaques positives et, naturellement, inversement proportionnelle à cette surface.

En résumé, *un élément d'accumulateur fonctionne comme un élément de pile dont la f. é. m. voisine de* 2 volts *est presque constante, la résistance intérieure très faible, et que l'on recharge quand il est épuisé.*

B. — Théorie de l'accumulateur au plomb.

5. Théorie de l'accumulateur au plomb.

Les phénomènes chimiques qui se produisent dans les matières actives des plaques à la charge et à la décharge ne sont pas bien connus parce que des composés qui se forment sont instables et par là difficiles à analyser. Aussi plusieurs théories du fonctionnement d'un élément d'accumulateur au plomb ont-elles été établies sans que les électriciens soient d'accord sur aucune.

La **théorie de la double sulfatation** explique les phénomènes que vous avez constatés.

Quand l'élément est chargé, la matière active positive est du peroxyde de plomb O_2Pb, la matière active négative du plomb spongieux Pb.

Les réactions principale et secondaire à la **décharge** sont les suivantes :

Décharge.

Plaque positive. *Sens du courant dans l'électrolyte* **Plaque négative.**

Matières actives au début : O_2Pb Pb

Réaction principale : $H_2 \longleftarrow SO_4H_2 \longrightarrow SO_4$ (*électrolyte*)

Réactions secondaires — *Plaque positive :* $O_2Pb + H_2 + SO_4H_2 \dashrightarrow 2H_2O + \mathbf{SO_4Pb}$

Plaque négative : $Pb + SO_4 \longrightarrow \mathbf{SO_4Pb}$

Le sulfate de plomb ainsi formé est très poreux, apte à entrer en réaction, alors que le sulfate de plomb ordinaire est en couche dure, peu perméable, difficile à décomposer pendant la charge.

Pendant la **charge,** les réactions sont inverses :

Charge.

Plaque positive $\xrightarrow{\text{sens du courant dans l'électrolyte}}$ **Plaque négative.**

Matières actives au début : SO_4Pb SO_4Pb

Réaction principale : $SO_4 \longleftarrow SO_4H_2 \longrightarrow H_2$ (*électrolyte*)

Réactions secondaires { *Plaque positive :* $SO_4Pb + SO_4 + 2H_2O \longrightarrow \mathbf{O_2Pb} + 2SO_4H_2$; *Plaque négative :* $SO_4Pb + H_2 \longrightarrow \mathbf{Pb} + SO_4H_2$

Les réactions qui se produisent pendant la décharge et la charge se résument par l'équation chimique :

$$\underset{-}{Pb} + 2SO_4H_2 + \underset{+}{O_2Pb} \rightleftarrows \underset{-}{SO_4Pb} + H_2O + \underset{+}{SO_4Pb}$$

qui se lit de gauche à droite pour la décharge et de droite à gauche pour la charge.

Cette théorie montre le rôle joué par les *matières actives* et l'*électrolyte* quand l'élément fonctionne.

En somme, *un élément d'accumulateur est un électrolyseur à électrodes de plomb et acide sulfurique, dont la f. c. é. m. peut entretenir un courant pendant plusieurs heures, parce que les produits de l'électrolyse sont fixés abondamment en corps peu stables par les électrodes.*

C. — Entretien d'un élément d'accumulateur.

La théorie qui précède montre que le fonctionnement d'un accumulateur est compliqué; aussi des soins minutieux sont-ils nécessaires pour conserver un élément en bon état.

a) ***Régime modéré de charge et de décharge.*** Pour que les réactions dans les matières actives aient le temps de s'effectuer, le courant absorbé ou fourni par un élément ne doit pas être trop intense. Charge et décharge s'effectuent chacune au moins en *quatre* heures. De temps en temps, une charge lente en *dix* heures et poussée à fond est utile.

Des éléments ne doivent pas rester déchargés : ils se *sulfatent.*

Des périodes de repos prolongées pendant plusieurs semaines sont nuisibles.

b) ***Veiller à la chute de matières actives.*** Les matières actives qui tombent des plaques à l'intérieur des bacs court-circuitent parfois deux plaques voisines de polarités différentes. Le courant de charge

passe dans le court-circuit et ne traverse plus l'électrolyte : l'élément ne se charge plus. Restant déchargé, il se sulfate.

La mesure de la f. é. m. de l'élément décèle le court-circuit.

c) ***Parfois des plaques positives se gondolent.*** La matière active positive foisonne pendant la charge. Si les deux faces d'une plaque positive ne se chargent pas également, la plaque se plie et vient en contact avec la négative voisine. L'élément est en court-circuit, il ne se charge plus et se sulfate.

d) On arrive quelquefois à remettre en bon état un élément sulfaté en remplaçant l'électrolyte par de l'eau acidulée très étendue et en donnant une charge très lente et très longue à intensité faible.

e) ***L'électrolyte doit recouvrir les plaques.*** On y ajoute au besoin de l'eau *distillée* si la densité est grande, ou de l'eau sulfurique à 30° B si la densité est faible, jamais d'acide sulfurique concentré.

Les accumulateurs sont des appareils délicats qui se détériorent très vite s'ils ne sont pas surveillés et entretenus régulièrement. Normalement, les plaques positives fournissent environ 400 décharges et les plaques négatives environ le double.

RÉSUMÉ

1. — Un élément d'accumulateur se compose de deux sortes de plaques de plomb plongées dans une solution d'acide sulfurique.
Les plaques positives sont couvertes d'une couche d'oxyde de plomb très oxygéné. La matière active des plaques négatives est du plomb pur spongieux.

2. — Pendant la décharge d'un élément, sa f. é. m. reste voisine de 2 volts pendant plusieurs heures, puis elle baisse rapidement. On arrête la décharge à 1,8 *volt*.

3. — Pendant la charge, la f. é. m. croît d'abord lentement, puis plus vite : on arrête la charge à 2,6 *volts*.

4. — L'acide sulfurique, les matières actives des plaques participent aux réactions chimiques de fonctionnement de l'accumulateur.

5. — Les accumulateurs au plomb sont délicats, il faut les surveiller et les entretenir régulièrement.

EXERCICES

1. Pourquoi le nombre des plaques négatives d'un élément d'accumulateur surpasse-t-il de un celui des plaques positives ?

2. Un élément d'accumulateur dont la f. é. m. est 2 *V* a une résistance intérieure de 0,005 Ω. Quelle est l'intensité du courant qui se produirait si l'on court-circuitait l'appareil avec un conducteur de résistance négligeable?

Réponse : 400 *ampères.*

3. Pour charger un accumulateur dont la capacité est 36 *Ah* on a employé 40 *Ah.* Quel est le *rendement en quantité* de l'appareil?

Réponse : 0,90.

4. On charge un petit élément d'accumulateur de 5 *Ah,* dont la résistance intérieure est 0,05 Ω avec deux éléments Leclanché à sac en série. La f. é. m. de chacun de ces éléments est 1,5 *V* et sa résistance intérieure 0,2 Ω. Il n'y a pas de rhéostat dans le circuit et la résistance des conducteurs est négligeable. En comptant que la f. c. é. m. de l'élément est 2 *V* en moyenne, calculer l'intensité et la durée de la charge pour un rendement en quantité de 0,90.

Réponses : 2,2 *ampères* — 2 *h* 30 *mn.*

5. Un élément d'accumulateur contient 5 plaques positives et 6 négatives, hautes de 155 *mm,* larges de 170 *mm.*

1° Calculer sa résistance intérieure à raison de 0,1 Ω par décimètre carré de surface de plaques positives.

2° Les plaques sont maintenues à 8 mm les unes des autres; l'électrolyte à 24° *B* a une résistivité de 1,4 $\Omega/cm/cm^2$. Calculer la part de la résistance de l'électrolyte dans la résistance intérieure de l'élément précédemment trouvée.

Réponses : 0,003 8 *ohm* — 0,000 4 *ohm.*

Batteries d'accumulateurs

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie portative de 3 éléments au plomb.
Une batterie portative de 6 éléments au plomb.
Un élément d'accumulateur alcalin.
Une batterie portative de 4 éléments alcalins.

LEÇON

A. — Batteries d'accumulateurs au plomb.

1. Les éléments d'accumulateurs ne se couplent qu'en série.

Le couplage en parallèle produit des courants de circulation intenses dans la batterie si la f. é. m. de quelques éléments est inférieure à celle des autres, parce que la ré istance intérieure est faible.

En pratique, on ne couple qu'en série des éléments identiques. Le même courant les traverse tous, il en résulte que *la capacité de la batterie est celle d'un élément.*

On emploie des batteries de quelques éléments et des batteries de plusieurs dizaines. Par exemple, les voitures automobiles sont munies de batteries de 3 éléments, soit 6 *volts* de 45 à 150 *ampères-heures* ou de 6 éléments, soit 12 *volts* de 30 à 75 *ampères-heures*; les ba eries de camions ont 6 ou 12 éléments de 75 à 150 *ampères-heures*. Des batteries stationnaires dans des usines, des hôpitaux, des grands magasins comprennent 60 éléments et parfois 110.

2. Pour qu'une batterie fournisse pendant la décharge une tension à peu près constante, elle doit comporter des éléments de réserve.

Approximativement, la f. é. m. d'un élément pendant la décharge est 2 *volts*. Plus précisément, elle est 2,1 *volts* au début et 1,8 *volt* à la fin. Cette variation est pratiquement sans importance quand la batterie n'alimente que des moteurs.

Quand elle alimente une installation d'éclairage par incandescence,

une tension presque constante est préférable : on augmente le nombre des éléments de la batterie dès que la f. é. m. tend à baisser.

Par exemple, pour une installation à 110 *volts*, la batterie doit comporter 110 : 2,1 ≃ 53 éléments au début de la décharge et 110 : 1,8 ≃ 62 éléments à la fin.

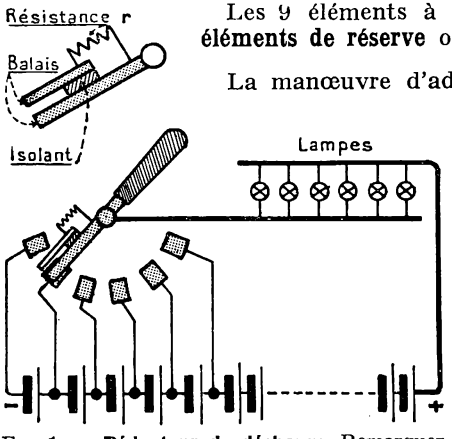


FIG. 1. — **Réducteur de décharge.** Remarquez la résistance de protection et la cale isolante entre les deux balais.

Les 9 éléments à ajouter un à un se nomment **éléments de réserve** ou de **réduction.**

La manœuvre d'addition est effectuée avec un **réducteur de décharge** (fig. 1). C'est un commutateur dont le frottoir est composé de deux balais réunis par une *résistance de protection.* Cet appareil permet de ne pas couper le courant débité pendant l'introduction dans le circuit d'un élément de réserve, et d'éviter la mise en court-circuit de l'élément ajouté quand le frottoir, dans son déplacement, touche simultanément les deux plots du commutateur connectés aux bornes de l'élément

Pendant la recharge de la batterie, le même réducteur, ou un second identique, sert à enlever du circuit les éléments de réduction qui sont chargés plus tôt que les autres, parce que leur décharge n'a pas été complète.

3. Calcul d'une batterie pour un service déterminé.

Soit à déterminer une batterie pour alimenter l'installation d'éclairage de secours d'un magasin. L'installation qui fonctionne en cas de panne du secteur est à 60 volts *et comprend* 30 *lampes qui consomment chacune* 0,66 ampère et 10 *lampes qui absorbent chacune* 1 ampère.

Pour que l'installation de secours soit toujours prête à fonctionner, on prévoit la charge et la décharge quotidiennes de la batterie en utilisant l'installation chaque soir pendant 4 *heures* à l'éclairage du magasin durant son nettoyage.

Nombre d'éléments. Au début de la décharge, il faut :

60 : 2,1 ≃ 29 éléments,

à la fin : 60 : 1,8 ≃ 34 éléments,

dont 5 de réserve.

Capacité de la batterie. Les lampes consomment :

$$(0{,}66 \times 30) + 10 = 30 \text{ } \textit{ampères}$$

soit en 4 *heures* : $30 \times 4 = 120$ *ampères-heures.*

Parce qu'une décharge en 4 *heures* est un régime dur, on choisira des éléments de 150 *ampères-heures* qui ne seront déchargés chaque jour qu'aux 4/5.

Recharge de la batterie. Il faut fournir journellement à la batterie $120 : 0{,}9 \simeq 133$ *ampères-heures.* Dans le cas où l'énergie électrique est fournie par un secteur à courant alternatif, on pourra charger les accumulateurs avec un *redresseur sec* capable de donner, en service continu, 7 à 8 *ampères* sous 60 à 72 *volts.*

En renonçant aux éléments de réserve qui ne s'imposent pas pour un tel éclairage, on réalisera une installation fonctionnant sans aucune intervention manuelle.

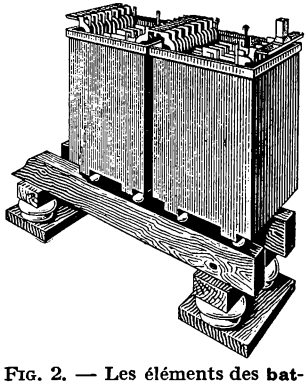


FIG. 2. — Les éléments des **batteries stationnaires** sont soigneusement isolés du sol.

4. Installation d'une batterie.

Le local doit être bien aéré pour éviter l'accumulation de gaz tonnant (mélange d'hydrogène et d'oxygène) en fin de charge.

La figure 2 montre comment sont disposés les éléments. Ils sont posés sur de petits isolateurs en verre ou en porcelaine placés sur des châssis en bois. Le chantier est isolé du sol par de plus gros isolateurs.

5. Pour charger une batterie importante, on emploie souvent une dynamo shunt.

La charge s'effectue **à intensité constante** ou à **tension constante.**

a) ***Charge à intensité constante.***

1° *La dynamo est affectée seulement à la charge de la batterie.* Dans le cas d'une batterie de 110 *volts* composée de 62 éléments dont 9 de réserve, la dynamo shunt doit fournir un peu plus de

$$1{,}8 \times 62 = 110 \text{ } \textit{volts}$$

au début de la charge et

$$2{,}6 \times 53 = 140 \text{ } \textit{volts}$$

à la fin. Elle est construite spécialement pour qu'une telle variation de sa f. é. m. soit possible.

On sort les éléments de réserve du circuit quand ils sont chargés avec un *réducteur de charge* (fig. 3).

Outre cet appareil, le tableau de distribution pour la charge porte un ampèremètre, un voltmètre, un rhéostat de réglage du courant et un disjoncteur polarisé qui coupe le circuit de charge si le courant

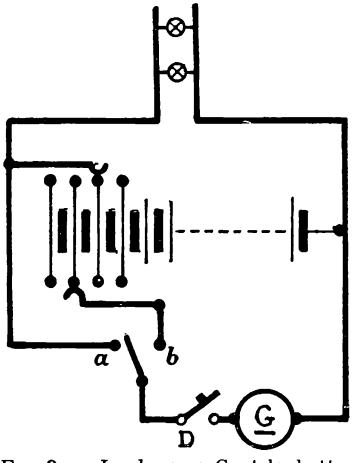


FIG. 3. — La dynamo G et la batterie peuvent alimenter le réseau **en parallèle.**

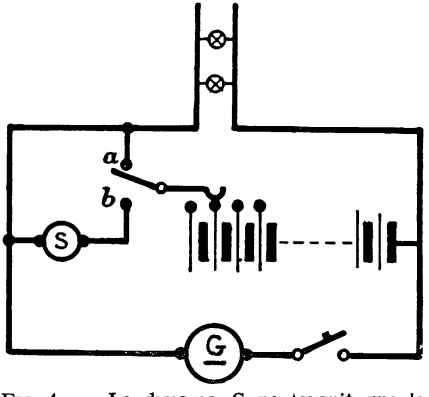


FIG. 4. — La dynamo G ne fournit que la tension du réseau. Un **survolteur** S est en série pour la charge de la batterie.

s'inverse dans le circuit à la suite d'une baisse accidentelle de la f. é. m. de la dynamo.

2° *La dynamo débite à la fois dans la batterie et dans un autre circuit.* Il n'est pas possible de faire varier beaucoup sa f. é. m.

Dans les installations importantes, une petite dynamo, dite **survolteur,** est placée en série dans le circuit de la batterie pour élever la tension à la valeur nécessaire pour la charge (fig. 4).

Dans les installations plus petites, on divise la batterie en deux *demi-batteries* que l'on charge en parallèle. La f. é. m. de la dynamo est alors largement suffisante.

b) ***Charge à tension constante.*** Ce procéde convient aux batteries sans éléments de réserve, par exemple à celles qui équipent les véhicules électriques.

On règle la tension de la dynamo pour qu'elle soit égale à la f. é. m. de la batterie à fin de charge et on place dans le circuit une résistance

qui limite le courant initial. L'intensité du courant est grande au début de la charge, elle décroît ensuite peu à peu. Quand elle est devenue très faible, c'est que la batterie est chargée : un disjoncteur à minima coupe alors le courant (fig. 5).

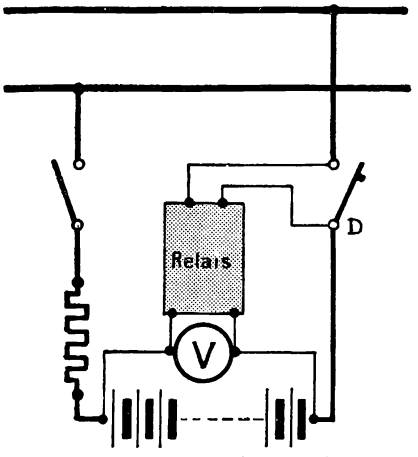


FIG. 5. — Charge d'une batterie à **tension constante.** Le relais ouvre automatiquement le disjoncteur D lorsque la tension aux bornes de la batterie atteint la valeur de fin de charge.

6. On charge aussi les batteries au moyen de redresseurs de courant.

Le **courant redressé** s'obtient avec du courant alternatif.

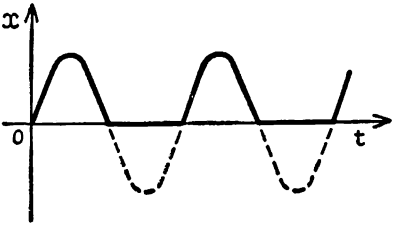


FIG. 6. — **Courant redressé.** Le redresseur supprime la demi-onde figurée en pointillé.

Vous savez que le courant alternatif, distribué par les secteurs à 50 *périodes par seconde*, passe dans son circuit dans un certain sens pendant 0,01 *seconde*, puis en sens contraire pendant le centième de seconde suivant et ainsi de suite. Les appareils nommés **redresseurs** ne laissent passer le courant que dans un certain sens, ils l'interrompent quand il tend à passer dans le sens contraire. Le courant dit redressé qui les traverse est donc en réalité un courant interrompu, d'intensité constamment variable, mais dont le sens est toujours le même (fig. 6).

Les principaux modèles de ces redresseurs sont :
les redresseurs à vapeur de mercure,
les lampes redresseuses,
les redresseurs soit cuproxyde, soit séléno-fer,
nous les étudierons plus loin.

On réalise avec ces redresseurs des chargeurs de batteries très commodes, parce qu'ils ne comportent aucun organe mobile et fonctionnent presque sans surveillance.

7. Emplois des accumulateurs.

Bien qu'ils soient malpropres, lourds et difficiles à maintenir en bon état, les accumulateurs sont très employés.

a) ***Batteries fixes ou stationnaires.***

Elles servent de secours pour l'éclairage des grands magasins, des banques, des hôpitaux, des théâtres, des cinémas en cas de panne du secteur.

On les monte en parallèle avec des dynamos génératrices dans des installations de tramways ou de moteurs qui ont à fournir un courant très variable. Dans ce montage en **tampon,** la batterie se charge quand la demande de courant dans le circuit extérieur est faible et que, par suite, la tension aux bornes des génératrices tend à s'accroître; elle se décharge et fournit une partie du courant consommé dans le réseau quand ce courant est intense. Elle permet ainsi l'emploi de génératrices moins puissantes.

b) ***Batteries transportables.***

Des batteries de grande capacité fournissent l'énergie électrique nécessaire aux sous-marins en plongée.

Les camions électriques sont équipés de batteries d'accumulateurs de 48 éléments, 96 *volts*, 380 ou 500 *ampères-heures* et peuvent parcourir une cinquantaine de kilomètres sans recharge.

Des batteries montées en tampon avec une petite dynamo assurent dans les automobiles ordinaires l'éclairage intérieur et extérieur des voitures, l'allumage et le démarrage des moteurs.

Des groupes analogues éclairent les wagons des trains.

B. — Perfectionnement des accumulateurs.

8. Des accumulateurs au plomb plus robustes ont été récemment inventés.

On a cherché à empêcher la chute de la matière active dans les éléments transportables.

Les *plaques positives* des éléments **Ironclad** sont composés d'une série de tubes verticaux en ébonite percés d'un grand nombre de fentes fines et rapprochées. Ces tubes sont emplis de la matière active, un conducteur central en plomb est soudé à une barrette inférieure et à une barrette supérieure. Une quinzaine de tubes sont ainsi assemblés les uns près des autres pour constituer une plaque.

Les *plaques négatives* sont du modèle que nous avons décrit.

Les éléments Ironclad ont, à poids égal, une capacité à peu près égale à celle des éléments ordinaires et leur durée est double.

9. Accumulateurs alcalins.

Ce sont les accumulateurs fer-nickel et cadmium-nickel.

a) ***Description.*** *L'électrode positive* de l'accumulateur fer-nickel est faite d'un mélange d'hydroxyde de nickel et de nickel en poudre tassé dans des tubes en acier nickelé finement perforés et montés dans un cadre en acier nickelé (fig. 7, 8 et 9).

L'électrode négative est de l'hydroxyde ferreux logé dans de petites boîtes en acier nickelé percées de petits trous et serties à la presse dans une monture en acier.

Les plaques sont séparées les unes des autres par des tiges d'ébonite. Les barrettes réunissant les plaques de même polarité sont en acier, et l'ensemble est placé dans un bac en tôle d'acier nickelé, fermé par un couvercle soudé, avec un bouchon hermétique.

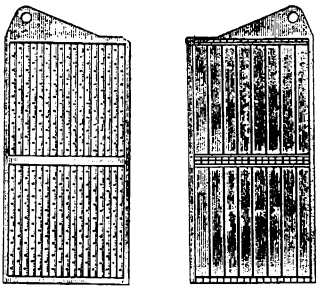


FIG. 7. — A gauche, plaque positive d'accumulateur alcalin. A droite, plaque négative.

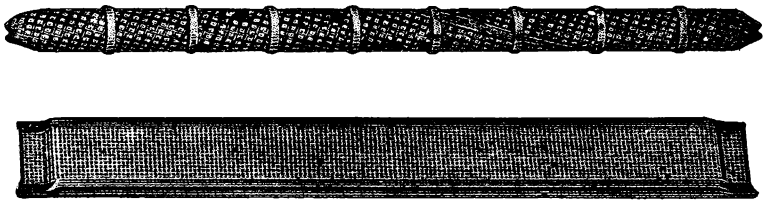


FIG. 8. — En haut, tube en acier nickelé, finement perforé, contenant la matière active positive.
En bas, petite boîte en acier nickelé perforé contenant la matière active négative.

L'électrolyte est une solution de potasse à 20 %.

FIG. 9. —.Voyez à l'intérieur du tube — dont on a enlevé une partie de la paroi — la matière active positive.

b) ***Fonctionnement.*** Pendant la charge, l'oxyde de nickel est oxydé et l'oxyde de fer réduit; l'inverse se produit pendant la décharge :

$$2\ Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2 \underset{décharge}{\overset{charge}{\rightleftharpoons}} 2\ Ni(OH)_3 + Fe.$$

A la décharge, la tension varie lentement de 1,3 *volt* à 1,1 *volt* pour tomber très vite à 0,9 *volt* (fig. 10).

Pendant la charge, qui doit durer environ 7 heures, la tension varie de 1,6 à 1,7 *volt*, puis croît à la fin jusqu'à 1,85 *volt*.

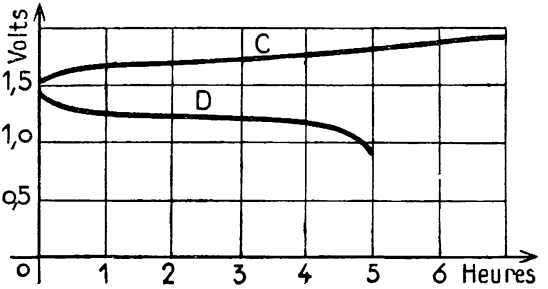


Fig. 10. — Courbe de charge et de décharge d'un élément d'accumulateur alcalin.

L'*élément cadmium-nickel* ne diffère de l'élément fer-nickel que par la matière active négative qui est de l'hydroxyde de cadmium [1]; il a, à peu près, les mêmes propriétés.

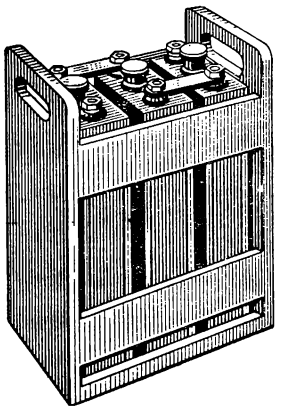


Fig. 11. — Batterie de trois accumulateurs alcalins.

c) ***Comparaison avec les éléments au plomb.***

Les éléments d'accumulateurs alcalins ont une f. é. m. plus faible (1,2 *volt*) et moins constante que les éléments au plomb, ils coûtent beaucoup plus cher.

Mais ils sont plus légers et beaucoup plus robustes. Ils peuvent rester déchargés sans inconvénient. Les courts-circuits ne les détériorent pas. Ils durent au moins pendant 1 000 décharges (fig. 11).

Les accumulateurs fer-nickel servent à équiper des appareils de traction : camionnettes électriques, tracteurs d'usines ou de gares.

On préfère les accumulateurs cadmium-nickel dans le cas de batteries à charge très lente ou devant conserver longtemps leur charge à circuit ouvert. Par exemple, des batteries cadmium-nickel de 24 *volts* (20 éléments) en tampon sur un redresseur cuproxyde alimentent souvent les petits centraux privés de téléphone automatique.

1. Le cadmium est un métal analogue au zinc.

RÉSUMÉ

1. — Une batterie d'accumulateurs se compose d'éléments couplés en série. Quand il s'agit d'accumulateurs au plomb, la f. é. m. de la batterie est d'environ 2 *volts* par élément.

Pour obtenir une f. é. m. plus régulière pendant la décharge, certaines batteries comportent des *éléments de réduction* et un réducteur de charge et de décharge.

2. — On charge une batterie soit avec une *dynamo shunt*, soit avec un *redresseur*. La charge au moyen d'une dynamo est effectuée à *intensité constante* ou à *tension constante*. Un *survolteur* est quelquefois mis en série avec la dynamo.

Les redresseurs suppriment une onde sur deux du courant alternatif, le courant redressé obtenu a un sens constant.

3. — Les accumulateurs alcalins sont plus robustes que les accumulateurs au plomb, mais ils sont plus coûteux et ne possèdent qu'une f. é. m. de 1,2 *volt* par élément.

4. — Les accumulateurs sont très employés. Dans les réseaux à courant continu où la consommation de courant est très variable, l'emploi d'une *batterie en tampon* avec les génératrices régularise le débit des dynamos.

EXERCICES

1. Quel est le nombre d'éléments d'une batterie de 120 *volts* avec éléments de réduction :

1° il s'agit d'une batterie au plomb;

2° il s'agit d'une batterie fer-nickel?

(Chercher dans la leçon les données nécessaires pour répondre aux deux questions.)

2. Une camionnette électrique de 1 000 *kg* est équipée d'une batterie au plomb de 48 éléments dont la capacité est 120 *Ah* pour une décharge en 5 *heures*.

Cette batterie est chargée la nuit, à tension constante, en la branchant sur une ligne de distribution à 115 *V*. La résistance de la ligne de branchement est 0,56 Ω. La résistance intérieure d'un élément est 0,005 Ω.

Déterminer le courant au début de la charge quand la f. c. é. m. est 1,8 *V* par élément.

Quelle est l'intensité pendant la plus grande partie de la charge, la f. c. é. m. atteint alors 2,2 *V* par élément?

Réponses : 36 *ampères* — 12 *ampères*.

3. La camionnette de l'exercice précédent consomme en moyenne 2,4 *Ah* par kilomètre. Quel trajet peut-elle parcourir sans recharge de la batterie? A quelle vitesse, si la décharge dure 5 *heures*?

La plupart du temps, chaque jour à midi, la batterie n'est que partiellement déchargée. On la remet en charge comme il est indiqué dans l'exercice 2 depuis midi jusqu'à 14 *heures*. Pendant cette charge partielle, dite *biberonnage*, la f. c. é. m. est 2,2 *V* par élément. De combien cette opération prolonge-t-elle le trajet de la camionnette possible dans la journée?

Réponses : 50 *km* — 10 *km/heure* = 10 *km*.

3. CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE ÉCLAIRAGE PAR INCANDESCENCE

12e LEÇON

Dégagement de chaleur dans un conducteur parcouru par un courant.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de 3 *éléments.*
Un ampèremètre 5 ampères, *gradué en dixièmes d'ampère.*
Un rhéostat de 3 ohms.
Un interrupteur.
Deux vases légers en laiton, fer-blanc ou verre mince, capacité ½ *litre.*
Une résistance de 1 ohm *(fil de ferro-nickel,* l = 25 cm, d = 0,5 mm, *boudiné et soudé à deux gros fils de cuivre traversant une planchette).*
Une résistance de 2 ohms *(fil de ferro-nickel,* l = 50 cm, d = 0,5 mm *monté comme le précédent).*
250 *grammes de pétrole (eau à la rigueur).*
Un thermomètre gradué en cinquièmes de degré.
Une montre à secondes.

LEÇON

1. On évalue les quantités de chaleur en calories.

La **calorie** (symbole : *cal*) *est la quantité de chaleur nécessaire pour augmenter de* 1 *degré la température de* 1 *gramme d'eau.*

Pour échauffer 500 *grammes* d'eau de 1 *degré*, il faut 500 *calories.* Quand 1 *gramme* d'eau se refroidit de 20° à 15°, il perd 5 *calories.*

La calorie est petite : on emploie parfois son multiple, la **kilocalorie** (symbole : *kcal*), qui vaut 1 000 *calories.*

En brûlant, 1 *kilogramme* de charbon donne environ 8 000 *kilocalories ;* 1 *mètre cube* de gaz de ville, 4 000 *kilocalories.*

Pour échauffer de 1 *degré* 1 *gramme* de pétrole, il suffit de 0,5 *calorie ;* pour 1 *gramme* de cuivre, il faut 0,093 *calorie*, de fer, 0,116 *calorie.* On dit que la chaleur spécifique du pétrole est 0,5 *calorie/gramme/degré.* celle du fer 0,116.

2. La quantité de chaleur produite par un courant dans un conducteur dépend de trois facteurs.

Ces trois facteurs sont :
la durée de passage du courant, *t secondes ;*
la résistance du conducteur, R *ohms ;*
l'intensité du courant, I *ampères.*

Pour établir l'effet de chacun d'eux, trois séries de mesures suffiront ; dans chacune d'elles nous ferons varier seulement l'un des facteurs en laissant fixes les deux autres.

3. La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la durée de passage du courant.

L'appareil employé pour le vérifier se compose d'un fil résistant AB de ferro-nickel, long de 25 *centimètres*, de diamètre 0,5 *millimètre*, enroulé en hélice et soudé à deux tiges de cuivre d'amenée du courant (fig. 1). Un ampèremètre, un rhéostat et un interrupteur sont en série avec lui. Le fil résistant est plongé dans 200 *grammes* d'eau, ou mieux de pétrole, contenus dans un

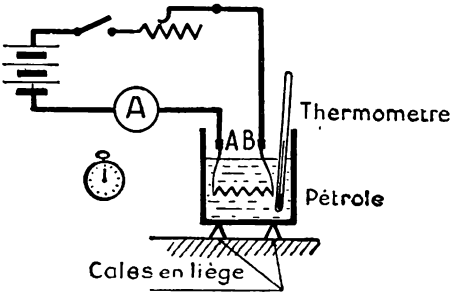


FIG. 1. — Montage pour mesurer la **quantité de chaleur** dégagée dans une résistance, l'**intensité** et la **durée de passage** du courant.

vase léger en fer-blanc, laiton ou verre mince, placé sur trois petits bouchons de liège. Un thermomètre divisé en cinquièmes de degré indique la température du pétrole. Une montre à secondes sert à mesurer le temps.

Notons la température initiale du pétrole, soit 15°. Faisons passer le courant. Lisons l'indication du thermomètre toutes les 2 *minutes* en ayant soin d'uniformiser la température en agitant le liquide. Les résultats de l'expérience sont les suivants :

COURANT CONSTANT, RÉSISTANCE CONSTANTE		
Durée de passage du courant	Température du pétrole	Élévation de température
0 *minute*	15°	
2 —	16,5°	1,5° ou 0,75° × 2
4 —	18°	3° ou 0,75° × 4
6 —	19,5°	4,5° ou 0,75° × 6

Les élévations de température sont proportionnelles au temps, c'est-à-dire que *la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la durée de passage du courant.*

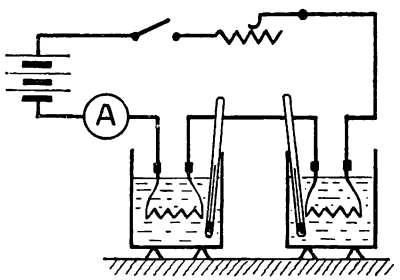


FIG. 2. — Les deux résistances sont montées en série pour qu'elles soient parcourues par le même courant pendant le même temps. **Les quantités de chaleur dégagées sont proportionnelles aux résistances.**

4. La quantité de chaleur dégagée dans un conducteur est proportionnelle à la résistance de ce conducteur.

Le fil chauffé employé dans l'expérience précédente a une résistance de 1 *ohm*. Préparons un second vase contenant aussi 200 *grammes* de pétrole avec un fil résistant de 2 *ohms* (ferronickel, $l = 0{,}50$ *m*, $d = 0{,}5$ *mm*).

Montons les deux fils résistants en série : ils seront ainsi traversés par le même courant pendant le même temps (fig. 2).

Notons la température initiale du pétrole dans chaque vase : soit 18° et 15°. Faisons passer le courant pendant environ 5 *minutes.*
Les températures finales dans chacun des vases atteignent 20°5 et 20°.

Le tableau qui suit

COURANT CONSTANT. TEMPS CONSTANT				
Vase	*Résistances*	*Températures initiales*	*Températures finales*	*Élévations de température*
C	1 Ω	18°	20,5°	2,5°
D	2 Ω	15°	20°	5° ou 2,5° × 2

montre que les élévations de température, et par conséquent *les quantités de chaleur dégagées, sont proportionnelles aux résistances des conducteurs.*

5. La quantité de chaleur dégagée est proportionnelle au carré de l'intensité du courant.

Employons l'un des vases qui vient de nous servir, par exemple le vase C.
Nous effectuerons trois expériences avec le même fil résistant; pour chacune, le courant passera pendant le même temps, mais avec des intensités différentes obtenues en manœuvrant le rhéostat et mesurées avec l'ampèremètre.

Dans le vase, nous mettons 240 *grammes* de pétrole froid, nous faisons successivement passer pendant 5 *minutes* des courants de 1 *ampère*, 2 *ampères*, 3 *ampères* et nous mesurons les élévations de température correspondantes. Nous obtenons :

RÉSISTANCE FIXE, DURÉES ÉGALES				
N° de l'expérience	*Courants*	*Températures initiales*	*Températures finales*	*Élévations de température*
1e	1 A	15°	15,6°	0,6° soit 0,6° × 1^2
2e	2 —	15,6°	18°	2,4° — 0,6° × 2^2
3e	3 —	18°	23,4°	5,4° — 0,6° × 3^2

Les élévations de température, et par conséquent les quantités de chaleur dégagées, sont proportionnelles aux carrés des intensités des courants.

6. Formule et loi de Joule.

a) Avec les résultats de l'une des trois expériences du paragraphe précédent, la première par exemple, calculons la quantité de chaleur dégagée par un courant de 1 *ampère*, dans une résistance de 1 *ohm*, en 1 *seconde*.

En 5 *minutes*, ou 60 × 5 = 300 *secondes*, le courant de 1 *ampère* passant dans une résistance de 1 *ohm* a augmenté de 0,6 *degré* la température de 240 *grammes* de pétrole.

Pour élever de 1 *degré* la température de 1 *gramme* de pétrole, il faut 0,5 *calorie;* pour l'élever de 0,6 *degré :*

$$0{,}5 \times 0{,}6 = 0{,}3 \text{ calorie,}$$

et pour 240 *grammes :*

$$0{,}30 \times 240 = 72 \text{ calories.}$$

Pendant 1 *seconde*, la quantité de chaleur produite a donc été :

$$72 : 300 = 0{,}24 \text{ calorie.}$$

Ainsi, *un courant de* 1 *ampère, dans une résistance de* 1 *ohm, en* 1 *seconde, produit* 0,24 *calorie.*

b) Calculons la quantité de chaleur Q *calories*, produite dans une résistance de R *ohms*, par un courant de I *ampères*, en *t secondes :*

Dans 1 *ohm*, 1 *ampère* en 1 *seconde*, produit..... 0,24 *calorie;*
— R *ohms*, 1 — 1 — — ..... 0,24 R —
— R — I *ampères*, 1 — — .... 0,24 RI^2 —
— R — I — *t secondes*, — ..... 0,24 RI^2t —

La formule

$$\underset{cal}{Q} = \underset{\Omega}{0{,}24}\ \underset{A}{R}\underset{s}{I^2t}$$

est l'expression algébrique de la **loi de Joule.**

Cette loi, qui rassemble les conclusions des expériences faites dans cette leçon, s'énonce : *dans un conducteur parcouru par un courant, la quantité de chaleur dégagée est proportionnelle à la résistance du conducteur au carré de l'intensité du courant, et au temps pendant lequel passe le courant.*

A ce dégagement de chaleur provoqué par la résistance du conducteur, on donne le nom d'**effet Joule.**

Exercice. — *Quel courant faut-il employer dans une résistance de* 10 ohms *pour échauffer* 1 *litre d'eau de* 15° *à* 100° *en* 15 *minutes?*

Pour échauffer de 15° à 100°, soit de 85°, 1 *gramme* d'eau, il faut 85 *calories*; pour 1 *kilogramme*, 85 000 *calories*. Cette chaleur doit être produite en 60 × 15 = 900 *secondes*.

En appliquant la formule de Joule :

$$85\,000 = 0{,}24 \times 10 \times I^2 \times 900$$
$$= 2\,160\ I^2$$
$$I^2 = 85\,000 : 2\,160 = 39{,}35$$
$$I = \sqrt{39{,}35} = 6{,}3 \text{ ampères.}$$

7. Température atteinte par un conducteur parcouru par un courant.

Un courant qui traverse un conducteur y dégage de la chaleur. Le conducteur s'échauffe. Quand sa température s'élève, il dissipe de la chaleur dans l'espace autour de lui. Il en dissipe d'autant plus que l'excès de sa température sur la température ambiante est plus grand.

En général, quand la température du conducteur a atteint une valeur suffisamment élevée, la chaleur dissipée devient égale à la chaleur produite par le courant. Une fois cet équilibre établi, la température du conducteur reste constante.

Quand la chaleur produite par effet Joule est très grande, ou quand le refroidissement est très lent, la température s'élève beaucoup, le conducteur rougit, devient incandescent et fond.

Pour les fils de cuivre isolés au caoutchouc des installations domestiques, la température d'équilibre ne doit pas dépasser de plus de 30° la température ambiante afin de ne pas détériorer rapidement l'isolant. On a déterminé expérimentalement les intensités maximums admissibles dans les conducteurs des différents diamètres usuels. Vous trouverez les résultats obtenus dans le tableau de la page 514. Par exemple, un fil de 1,2 *millimètre* de diamètre, isolé en caoutchouc et installé sous moulure, admet un courant maximum de 13 *ampères*.

Ce tableau montre que la densité de courant qui produit l'échauffement limite est plus grande pour les fils fins que pour les gros. Ainsi elle est 11,5 *ampères par millimètre carré* dans un fil de 12/10 et seulement de 6,7 *ampères par millimètre carré* dans un fil de 25/10.

C'est que les fils fins se refroidissent plus facilement que les gros. C'est par la surface latérale des fils que se dissipe la chaleur. On démontre qu'à masse égale des fils de même nature ont des surfaces latérales inversement proportionnelles à leurs diamètres.

8. Conclusion.

L'effet Joule, que nous venons d'étudier, est la propriété la plus importante de la résistance électrique.

Nous avons montré dans des leçons précédentes que la résistance électrique d'un circuit :

diminue l'intensité du courant,
produit une chute de tension le long du conducteur,
cause un dégagement de chaleur.

En réalité, ces trois propriétés ne sont pas différentes : elles sont trois aspects du même phénomène : *la transformation partielle de l'énergie électrique en chaleur dans une résistance.*

RÉSUMÉ

1. — Le passage d'un courant dans un conducteur y produit une quantité de chaleur proportionnelle :

1° à la *résistance* R du conducteur,
2° au carré I^2 de l'intensité du courant,
3° à la *durée t* de passage du courant.

2. — La *loi de Joule* résumée par la formule

$$Q = 0{,}24\ RI^2t$$

donne la valeur en calories de la quantité de chaleur dégagée.

3. — La chaleur produite par effet Joule échauffe le conducteur, elle peut le porter au rouge et le fondre, ou l'amener à une température stable pour laquelle la chaleur due au courant est dissipée par refroidissement dans l'espace.

EXERCICES

1. Combien de temps faut-il à un courant de 1 *A* passant dans une résistance de 1 Ω pour produire 1 *calorie?*

Réponse : 4,17 *secondes.*

2. Calculer le courant nécessaire pour faire bouillir, en 15 *minutes*, 500 *g* d'eau prise à la température de 16°, en employant une résistance de 10 Ω?

Réponse : 4,4 *ampères.*

3. Un fer à repasser monté sur une distribution à 110 *V* absorbe 2,5 *A*. Quelle est sa résistance? Combien s'y dégage-t-il de calories par seconde?

Réponse : 44 *ohms* — 66 *calories.*

4. Une lampe électrique est alimentée par une ligne de deux fils en cuivre ayant chacun 14 *m* de longueur et 12/10 *mm* de diamètre. La lampe a une résistance de 300 Ω et absorbe 0,36 *A*.

Calculer la chaleur dégagée en 1 *heure :*

1° dans la lampe;
2° dans les fils de la ligne.

On déterminera la résistance de la ligne avec le tableau de la page 512.

Réponses : 33,5 *kilocalories* — 465 *calories.*

Travail et puissance. Énergie.

LEÇON

A. — Travail mécanique.

1. Quand on élève un poids, on effectue un travail mécanique.

Regardons la figure 1. Des maçons montent des briques sur un échafaudage.

1° Jacques a travaillé deux fois plus que Paul, puisque Paul devrait

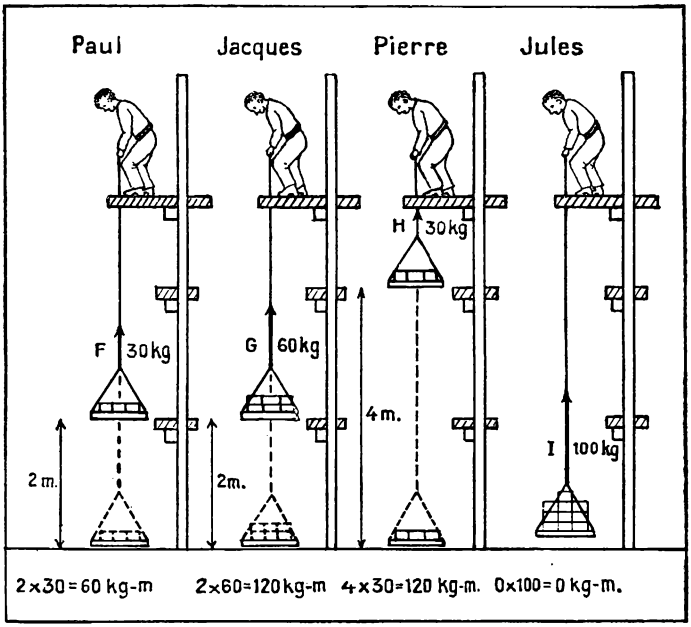


FIG. 1. — Paul a fourni un certain travail. Pourquoi ? Jacques a fourni deux fois plus de travail que Paul. Pourquoi ? Pierre a aussi fourni deux fois plus de travail que Paul. Pourquoi ? Jules a soutenu son fardeau sans l'élever. Il n'a pas produit de travail. Pourquoi ?

recommencer sa manœuvre et hisser une nouvelle charge de 20 *kilogrammes-poids* de briques pour obtenir le même effet utile que Jacques. La force F_2 de 40 *kilogrammes-poids* a donc effectué un travail deux fois plus grand que la force de 20 *kilogrammes-poids* pour le même déplacement : **le travail d'une force est proportionnel à la grandeur de la force.**

2° Pierre a travaillé deux fois plus que Paul, puisque Paul devrait recommencer sa manœuvre et hisser sa charge de 2 *mètres* encore pour obtenir le même effet utile que Pierre. La force F_3 de 20 *kilogrammes-poids* a donc effectué un travail deux fois plus grand que la force F_1 de même grandeur qu'elle : **le travail d'une force est proportionnel au déplacement du point d'application dans la direction de la force.**

3° Jules a soutenu en l'air, pendant 15 *minutes*, 20 *kilogrammes-poids* de briques. Il n'a pas travaillé bien qu'il soit fatigué. Il n'avait qu'à attacher la corde à une poutre : il aurait obtenu le même résultat sans fatigue. La force F_4, dont le point d'application reste immobile, ne travaille pas.

2. L'unité de travail des mécaniciens est le kilogrammètre.

Le kilogrammètre (symbole : *kgm*) **est le travail produit par une force de 1 kilogramme-poids dont le point d'application se déplace de 1 mètre dans la direction de la force.**

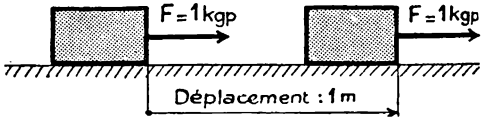


FIG. 2. — La force F de 1 *kgp*, dont le point d'application s'est déplacé de 1 *m*, a produit un travail de 1 *kilogrammètre*.

Exemples. — Un corps pèse 1 *kilogramme-poids*, il tombe de 1 *mètre* : son poids produit un travail de 1 *kilogrammètre*.

Vous tirez sur un corps quelconque avec une force de 1 *kilogramme-poids* et vous le déplacez de 1 *mètre* dans la direction où vous le tirez : le travail de la force est 1 *kilogrammètre* (fig. 2).

3. Calculons le travail produit par une force de 3 kilogrammes-poids dont le point d'application se déplace de 4 mètres dans la direction de la force.

1 *kgp*, pour un déplacement de 1 *m*, produit un travail de 1 *kgm*,
3 *kgp* — 1 *m*, produisent — $1 \times 3 = 3$ —
3 *kgp* — 1 *m*, — $3 \times 4 = 12$ —

Quand la force est *F kilogrammes-poids* et le déplacement *L mètres*, le travail produit est un nombre de kilogrammètres A, tel que :

$$\underset{kgm}{A} = \underset{kgp}{F} \times \underset{m}{L}$$

4. Le joule est une autre unité de travail.

Pour évaluer un travail, les électriciens emploient souvent le **joule**[1] (symbole J) comme unité et son multiple le **kilojoule** (symbole : *k*J).

Le **joule** est le travail produit par une force de 1 **newton** dont le point d'application se déplace de 1 **mètre** dans la direction de la force.

1 **kilogrammètre vaut** 9,81 **joules.**

B. — Puissance mécanique.

5. Un moteur est d'autant plus puissant qu'il produit plus de travail en un temps donné.

Un homme qui élève des briques, un cheval qui tire une voiture, une locomotive qui remorque des wagons, une machine à vapeur, parce qu'ils produisent du travail, se nomment des **moteurs.**

En un temps déterminé, par exemple en un quart d'heure, ces moteurs fournissent plus ou moins de travail, on dit qu'ils sont plus ou moins *puissants.*

Par convention, **la puissance d'un moteur est mesurée par le travail que le moteur fournit pendant chaque seconde.**

6. Les unités principales de puissance sont le kilogrammètre par seconde et le watt.

1° Le **kilogrammètre par seconde** (symbole : *kgm/s*) est la puissance d'un moteur qui fournit un travail de 1 *kilogrammètre* pendant chaque seconde.

On emploie aussi comme unité de puissance le **cheval-vapeur** (symbole : *ch*) : c'est la puissance d'un moteur qui fournit un travail de 75 *kilogrammètres* par seconde.

2° Au *joule*, unité de travail, correspond le *watt*[2], unité de puissance. Le **watt** (symbole : W) est la puissance d'un moteur qui fournit un travail de 1 *joule* pendant chaque seconde.

Un multiple de cette unité, le **kilowatt** (symbole : *k*W) qui vaut 1 000 *watts*, est fréquemment utilisé.

3° Un moteur de 1 *cheval-vapeur* fournit un travail de 75 *kilogrammètres* pendant chaque seconde. Or, 1 *kilogrammètre* vaut 9,81 *joules*, 75 *kilogrammètres* équivalent à 9,81 × 75 = 736 *joules*, donc 1 *cheval-vapeur* vaut 736 *watts.*

1 ch = 736 W = 0,736 kW

1. Nom donné en l'honneur de *Joule*, illustre physicien anglais (1818-1889).
2. En hommage à la mémoire de *James Watt*, célèbre mécanicien anglais (1736-1819).

7. Certaines unités de travail dérivent des unités de puissance.

Le **watt-heure** (symbole Wh) est le travail produit en 1 heure par un moteur d'une puissance de 1 watt.

L'**hectowatt-heure** (hWh) et surtout le **kilowatt-heure** (kWh) sont des multiples très employés.

Vous démontrerez facilement que 1 *watt-heure* vaut 3 600 *joules* et 1 *kilowatt-heure*, 3 600 *kilojoules*.

C. — L'énergie. Sa conservation.

8. L'énergie est le pouvoir de produire du travail mécanique.

a) Un lourd wagon *lancé à grande vitesse* produit, quand il s'arrête brusquement sur un obstacle, un important travail mécanique de destruction. Il possédait avant son arrêt, et parce qu'il était en mouvement, de l'**énergie cinétique.**

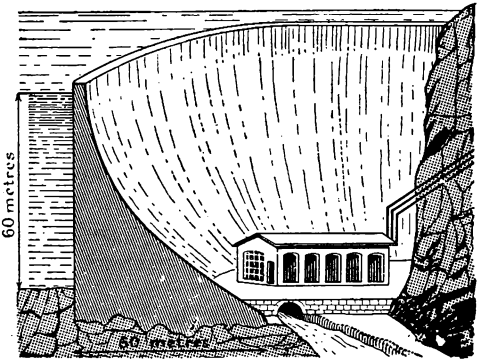


FIG. 3. — **Coupe schématique** du barrage de la Creuse à Eguzon (Indre). L'eau retenue par le barrage est capable de produire du travail mécaniques elle possède de l'*énergie potentielle.*

b) L'eau d'un lac de montagne peut être amenée par des conduites à une turbine hydraulique installée beaucoup plus bas, faire tourner la machine et produire ainsi du travail mécanique. L'eau du lac est immobile. Cependant elle possède de l'énergie latente[1], en réserve jusqu'à son utilisation, de l'**énergie potentielle** (fig. 3).

Parce que l'*énergie cinétique* et l'*énergie potentielle* se transforment directement en *travail mécanique*, sans l'intermédiaire d'un autre phénomène (calorifique, chimique ou électrique), on les désigne aussi du nom d'**énergie mécanique.**

9. L'énergie existe sous plusieurs formes.

Outre l'*énergie mécanique*, nous citerons :

la *chaleur* que l'on transforme en énergie mécanique, du moins

1. Latente : cachée. L'énergie de l'eau du lac est *invisible*; elle est en quelque sorte *cachée.*

partiellement, dans les machines à vapeur et les moteurs à explosion;

l'*énergie chimique*, souvent à l'état d'énergie potentielle, comme celle de la poudre ou de la dynamite;

l'*énergie électrique* qui, dans les moteurs électriques, donne du travail mécanique.

10. Les différentes formes d'énergie se transforment les unes en les autres.

La transformation de l'*énergie électrique* est surtout facile : avec de

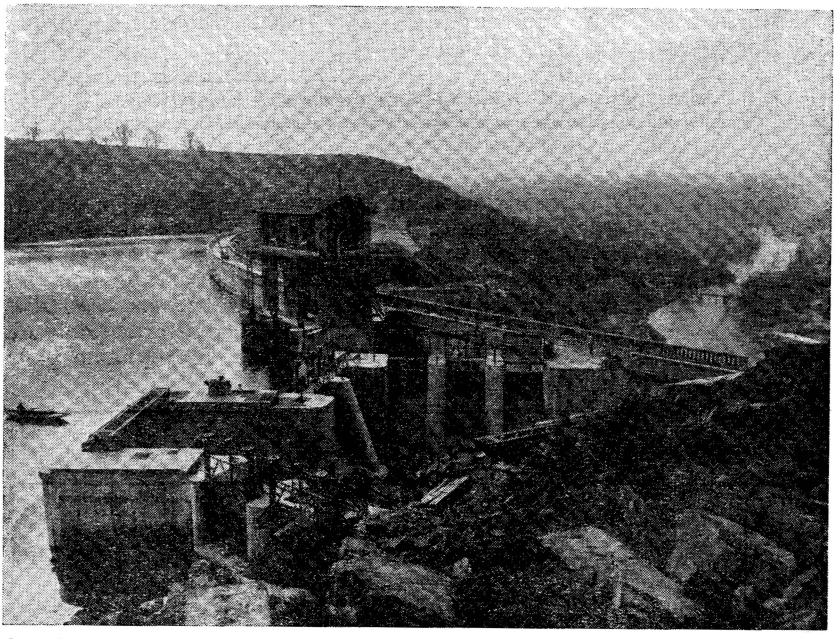


FIG. 4. — Barrage-réservoir sur la Creuse à Eguzon (Indre). La vue est prise en amont du barrage, alors que le schéma de la figure 3 représente le barrage vu de l'aval.

l'énergie électrique nous savons faire de la chaleur, il suffit de faire passer du courant dans une résistance; dans les cuves à électrolyse, elle devient de l'énergie chimique; nous étudierons plus tard sa transformation en énergie mécanique. On l'évalue avec les unités mécaniques, le *joule* et le *kilowattheure*.

L'*énergie mécanique* se transforme en énergie électrique au moyen

de dynamos et d'alternateurs. Vous avez constaté que, par choc et par frottement, l'énergie mécanique devient de la chaleur.

L'*énergie calorifique* provient souvent d'énergie chimique, par exemple la combustion du charbon par l'oxygène de l'air donne de la chaleur. L'énergie calorifique s'évalue le plus souvent en calories, mais on l'exprime aussi avec les unités employées pour l'énergie mécanique et électrique.

Joule a établi que

1 calorie équivaut à 4,18 joules.

Inversement 1 *joule* équivaut à 1 : 4,18 $\simeq$ 0,24 *calorie*, et puisque 1 *kilowattheure* vaut 3 600 *kilojoules* :

1 kilowattheure équivaut à environ 860 kilocalories.

11. Principe de la conservation de l'énergie.

Chaque fois qu'il y a transformation d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres formes, la quantité totale d'énergie n'augmente ni ne diminue; l'énergie transformée d'une part, les énergies produites d'autre part, sont rigoureusement équivalentes : **l'énergie se conserve en quantité.**

Ce principe de conservation de l'énergie est absolu, sans exception.

Par exemple, le tableau suivant montre les transformations de 1 000 *kilowattheures* d'énergie mécanique fournis à une dynamo pour produire de l'énergie électrique.

ÉNERGIE FOURNIE		ÉNERGIES PRODUITES			
kWh					*kWh*
		Énergie mécanique transformée en chaleur par frottement (paliers, balais, ventilation)			40
1 000	Énergie mécanique fournie à la dynamo	Énergie mécanique transformée en énergie électrique	Énergie électrique transformée en chaleur	dans le cuivre des inducteurs	25
				dans le cuivre de l'induit	31
				dans le fer de l'induit	9
			Énergie électrique utile fournie au circuit extérieur		895
		TOTAUX			
1 000	←—— Énergie fournie = Énergies produites ——→				1 000

En somme, il n'y a ni *création*, ni *destruction*, mais seulement *transformation* d'énergie.

Vous remarquerez qu'une partie de l'énergie fournie (10,5 %) a été transformée en chaleur, alors que l'opération avait pour but la production d'énergie électrique.

RÉSUMÉ

1. — Une force travaille quand son point d'application se déplace dans sa direction.

2. — L'unité de travail des mécaniciens est le *kilogrammètre* (kgm). C'est le travail effectué par une force de 1 *kilogramme=poids* dont le point d'application se déplace de 1 *mètre* dans sa direction.

Le travail produit par une force de F *kgp* dont le point d'application se déplace de L *mètres* dans la direction de la force est

$$A_{kgm} = F_{kgp} \times L_m.$$

3. — Le *joule* est aussi une unité de travail, 1 *kilogrammètre* vaut 9,81 *joules*.

4. — La *puissance* d'un moteur a pour mesure le travail que le moteur effectue en 1 *seconde*.

Les unités de puissance sont :

1° le *kilogrammètre par seconde* (kgm/s);
2° le *cheval=vapeur* (*ch*); 1 *ch* = 75 *kgm/s*;
3° le *watt* ou joule par seconde, 1 *ch* = 736 W;
4° le *kilowatt* (kW) qui vaut 1 000 W.

5. — L'énergie est le pouvoir de produire du travail. L'énergie se présente sous de nombreuses formes : mécanique, calorifique, chimique, électrique, etc.

Chaque fois qu'il y a transformation d'énergie, la quantité totale d'énergie reste la même : c'est le *principe de la conservation de l'énergie*.

EXERCICES

1. En une journée de 8 heures, un homme fournit environ 200 000 *kgm*. Son salaire horaire est **1,8 F,** s'y ajoutent 50 % de taxes diverses.

Le fonctionnement pendant 1 *heure* d'un moteur électrique de 1 *ch* coûte 0,45 **F.**

Combien le travail mécanique humain coûte-t-il de fois plus que le travail d'un moteur électrique?

Réponse : 64,8 *fois plus.*

2. En 1948, le *kilowattheure* électrique coûtait 16,04 *francs*, le mètre cube de gaz de ville était payé 9,22 *francs*. Ce gaz produit en brûlant 4 000 *kilocalories* par mètre cube.

1° Combien coûtaient 1 000 *kcal* produites à partir de l'énergie électrique?

2° Combien coûtaient 1 000 *kcal* provenant de la combustion du gaz de ville? Conclure.

Réponses : 18,60 *f* — 2,30 *f.*

3. Un lac de montagne alimente une chute d'eau qui fait tourner les turbines d'une usine génératrice de courant électrique. Les turbines actionnent des dynamos qui produisent le courant. Ce courant est utilisé pour l'éclairage et la commande de machines-outils.

Faire un tableau des formes successives prises par l'énergie mécanique potentielle de l'eau du lac.

4. Évaluer en *kilowatts* la puissance d'un moteur électrique de 5 *chevaux.*

Réponse : 3,68 *kilowatts.*

5. Une automobile roule à la vitesse de 72 *kilomètres/heure.* Son moteur fournit alors une puissance de 24 *chevaux* dont 19 seulement parviennent aux essieux des roues motrices. Quelle est l'intensité, en *kilogrammes-poids,* de la force constante qui donnerait à la voiture la même vitesse?

Réponse : 71,250 *kgp.*

6. Bien des personnes confondent *kilowatt* et *kilowattheure.* Définir ces deux mots et donner un exemple de l'emploi correct de chacun d'eux.

7. Une pompe élève, en 5 *minutes,* 3 *mètres cubes* d'eau à 15 *mètres* de hauteur. Quel travail effectue-t-elle? Quelle puissance fournit-elle?

Réponses : 45 000 *kgm* — 2 *ch.*

8. Un alternateur d'une grande centrale électrique peut fournir une puissance de 65 000 *kW.* Calculer l'énergie électrique qu'il produit en fonctionnant jour et nuit, sans interruption, pendant une année de 360 jours.

Réponse : 40,5 *millions de kWh.*

9. L'éclairage électrique d'un appartement absorbe une puissance de 600 *watts.* Toutes les lampes sont allumées chaque jour pendant 6 *heures.* Quelle est la dépense pour l'éclairage par mois de 30 jours? Le *kilowattheure* est payé 0,33 NF.

10. Quelle est la puissance fournie par un treuil quand il élève un fardeau de 2 *tonnes* à la vitesse de 0,50 *mètre par seconde?*

Réponse : 13,3 *ch.*

Énergie et puissance électriques. Rendement industriel d'une machine.

LEÇON

A. — Énergie et puissance électriques.

1. Énergie produite par un courant dans une résistance (fig. 1)

Cette énergie est de la chaleur. Sa valeur, exprimée en *calories*, est donnée par la formule de Joule :

$$Q = 0{,}24\ RI^2t.$$

Évaluons-la en *joules*. Vous savez que 1 *calorie* équivaut à 4,18 *joules* :

$$W = 4{,}18 \times Q = 4{,}18 \times 0{,}24\ RI^2t = RI^2t \text{ joules.}$$

Cette expression peut s'écrire :

$$W = RI \times I\ t,$$

et, puisque le produit RI de la résistance par l'intensité est, d'après la loi d'Ohm, égale à la tension U entre les bornes de la résistance :

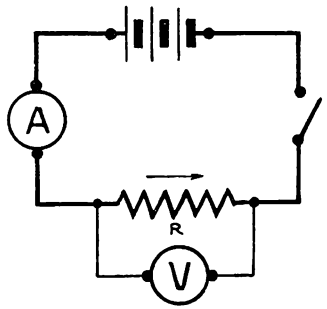


FIG. 1. — L'énergie produite par le courant I dans la résistance R, en t secondes, est $W = RI^2t$.

$$\boxed{W = UIt} \qquad (1)$$

J V A s

2. Puissance produite par un courant dans une résistance.

La puissance est l'énergie produite en 1 *seconde;* remplaçons t par 1 dans la formule (1), la puissance est exprimée en *watts :*

$$\boxed{P = UI} \qquad (2)$$

W V A

Nous avons établi les formules (1) *et* (2) *dans le cas d'un récepteur*

calorifique, mais elles sont générales et s'appliquent à tous les récepteurs et à tous les générateurs (fig. 2).

Exemples.

1° Un moteur électrique est alimenté par une ligne à 220 *V* qui lui fournit 20 *A*. La puissance électrique absorbée par le moteur est :

$$P = UI = 220 \times 20 = 4\,400\ W$$

soit 4,4 *kilowatts.*

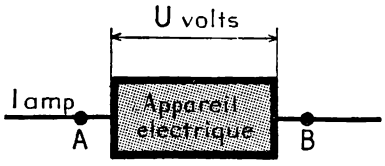


FIG. 2. — La **puissance** fournie par le courant à l'appareil électrique est UI *watts.*

2° Une dynamo débite 250 *A* et la tension entre ses bornes est 440 *V*, la puissance électrique qu'elle fournit est :

$$P = UI = 440 \times 250 = 110\,000\ W$$

soit 110 *kilowatts.*

3. Les relations entre les grandeurs électriques sont simples.

Les principales grandeurs électriques sont :

l'intensité de courant,	que l'on exprime en	*ampères,*	soit I;
la résistance électrique,	—	*ohms,*	— R;
la tension électrique,	—	*volts,*	— U;
la puissance électrique,	—	*watts,*	— P;

Ces nombres, I, R, U, P, sont liés par les formules :

U = RI, qui traduit la loi d'Ohm,

et P = UI, qui provient de la loi de Joule.

Ces deux relations sont simples; elles ne contiennent pas de coefficient numérique comme, par exemple, la formule de Joule $Q = 0{,}24\ RI^2t$ *calories*; simplicité qui n'est pas fortuite, car elle résulte du choix des unités employées.

Le **watt,** unité de puissance, est une unité mécanique. C'est la puissance d'un moteur qui produit un travail de 1 *joule* en 1 *seconde.*

Le **joule** est le travail produit par une force de 1 *newton* dont le point d'application se déplace de 1 *mètre* dans la direction de la force.

Le **newton** est la force qui, pendant chaque *seconde,* communique à un corps dont la masse est 1 *kilogramme* un accroissement de vitesse de 1 *mètre* par *seconde.*

Vous voyez que le *watt* dérive des unités des grandeurs fondamentales du système international (SI) :

le **mètre,** unité de *longueur,*
le **kilogramme,** unité de *masse,*
la **seconde,** unité de *temps.*

Dans la deuxième leçon d'électricité, nous avons donné la définition légale de l'**ampère,** unité d'intensité de courant, rattachée au *newton.*

Voici la définition du **volt** (loi du 14 janvier 1948) : *c'est la tension qui existe entre deux points d'un fil conducteur transportant un courant constant de* 1 ampère *lorsque la puissance dissipée entre ces points est égale à* 1 **watt.**

Légalement, *l'***ohm** *est la résistance électrique qui existe entre deux points d'un conducteur lorsqu'une tension de* 1 volt *appliquée entre ces deux points produit dans le conducteur un courant de* 1 **ampère,** *ce conducteur n'étant le siège d'aucune force électromotrice.*

Ce rapprochement des définitions nous montre que les différentes unités dérivent logiquement et simplement les unes des autres : **on dit** qu'elles forment un *système cohérent.*

4. La puissance d'un appareil électrique à courant continu se mesure avec un ampèremètre et un voltmètre.

L'ampèremètre est monté en série avec l'appareil, le voltmètre est placé en dérivation entre les bornes. Le produit $P = UI$ donne la puissance absorbée dans le cas d'un récepteur, la puissance débitée dans le cas d'un générateur (fig. 3).

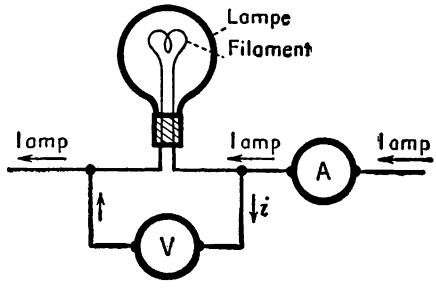


FIG. 3. — Pour **mesurer la puissance** absorbée par la lampe, on emploie un ampèremètre A et un voltmètre V.

La **puissance nominale** d'une machine électrique est celle pour laquelle la machine a été construite, qu'elle peut absorber ou débiter sans se détériorer. Mais sa *puissance effective* dans un emploi déterminé peut être toute différente. Par exemple, une dynamo construite pour débiter en service continu 100 *ampères* avec 110 *volts* à ses bornes a une *puissance nominale* de 11 *kilowatts;* quand elle fournit seulement 10 *ampères* et 110 *volts* sa *puissance effective* n'est que $110 \times 10 = 1\,100$ *watts,* soit 1,1 *kilowatt.*

Quand on indique la puissance d'un **générateur,** il s'agit de la puissance électrique qu'il fournit dans l'installation qu'il alimente.

Quand on indique la puissance **d'un moteur,** il s'agit de la puissance mécanique disponible sur son arbre.

5. L'énergie électrique se mesure avec un compteur.

La figure 4 représente un compteur wattheuremètre. C'est une sorte de petit moteur électrique dont l'arbre vertical tourne lentement et fait 1 tour quand le compteur est traversé par une quantité d'énergie connue, par exemple 0,2 *watt-heure*. Une série de petites roues dentées, engrenant les unes avec les autres et mues par l'arbre du compteur enregistre l'énergie qui a traversé le compteur.

Examinons le cadran de l'appareil. Il porte en grosses lettres l'indication *hWh* : l'hectowattheure est donc l'unité de mesure utilisée. Vous remarquez six petits cercles gradués de 0 à 10 sur lesquels se déplacent autant d'aiguilles, mais elles ne se meuvent pas toutes dans le même sens. Sur le cercle A qui indique les milliers d'hectowattheures, l'aiguille tourne dans le sens des aiguilles d'une

FIG. 4.
Compteur wattheuremètre

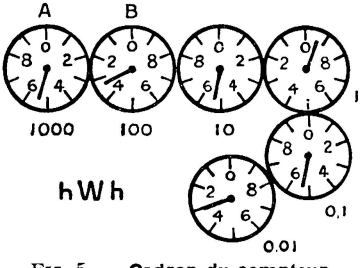


FIG. 5. — **Cadran du compteur.**
Il indique 5359,53 *hWh*.

montre; sur le cadran B, celui des centaines d'hectowattheures, l'aiguille tourne en sens inverse et ainsi de suite, alternativement dans un sens et dans l'autre (fig. 5).

Pour *relever le compteur*, on note les indications de toutes les aiguilles dans l'ordre des unités décroissantes; quand l'aiguille est entre les deux chiffres, c'est le plus faible qu'il faut lire. En effectuant la différence des nombres obtenus dans deux relevés, on obtient le nombre d'hectowattheures consommés dans l'intervalle [1].

1. Dans certains compteurs, des chiffres remplacent les cadrans et les aiguilles. Pour « relever le compteur », il suffit de lire le nombre formé par ces chiffres.

6. Examinons une quittance d'abonné d'un secteur de distribution électrique.

Elle concerne une petite installation d'éclairage à un seul compteur.

Elle indique d'abord le prix de l'énergie :

Prix du *kWh* au tarif éclairage : 0,331 F

puis le dernier relevé du compteur (en *kWh*) : 477 et le relevé précédent : 440. Leur différence, soit 37 *kWh*, est la quantité d'énergie à payer au secteur.

Le prix de cette énergie est

$$0{,}331 \times 37 = 12{,}25 \text{ F}$$

s'y ajoutent **3,28 F de** frais fixes. Le montant de la quittance est 15,53 F.

B. — Rendement industriel d'une machine.

7. Rendement d'une machine électrique.

Reportez-vous au tableau donné au paragraphe 11 de la leçon précédente. Il s'agit d'une dynamo que l'on fait fonctionner pour obtenir de l'énergie électrique en lui fournissant de l'énergie mécanique.

Elle absorbe 1 000 *kilowattheures* d'énergie mécanique pour produire 895 *kilowattheures* d'énergie électrique. Une partie de l'énergie fournie, soit 105 *kilowattheures*, est transformée en chaleur qui échauffe la machine et l'air qui l'entoure.

L'énergie électrique est seule *utile*, l'énergie calorifique formée en même temps est de l'énergie dont on ne peut tirer aucun profit : on dit que c'est de l'*énergie perdue*, bien qu'en réalité elle existe encore, mais sous une forme inutilisable.

Le **rendement industriel** de la machine est le **rapport** entre l'énergie électrique disponible aux bornes de la dynamo ou *énergie utile* et l'énergie mécanique appliquée à l'arbre ou *énergie totale absorbée*, soit

$$\frac{895}{1\,000} = 0{,}895.$$

Il est presque toujours plus commode de considérer, au lieu des *énergies*, les *puissances* qui leur sont proportionnelles, donc

$$\textit{rendement} = \frac{\textit{puissance utile}}{\textit{puissance totale absorbée}}$$

On définit de même le **rendement d'un moteur** ou d'un appareil électrique quelconque [1].

Représentons le rendement par η (êta), par P_u la puissance utile, par P_t la puissance totale absorbée : les trois formules suivantes sont équivalentes :

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}, \qquad P_u = P_t \times \eta, \qquad P_t = P_u : \eta.$$

8. Pour calculer le rendement d'une machine électrique, on détermine parfois les pertes dans la machine.

La *puissance totale absorbée* par une dynamo, la *puissance utile* fournie par un moteur sont de la puissance mécanique. Or, il est peu commode de mesurer une puissance mécanique. Par contre, en général, il est facile de mesurer ou de calculer la *puissance perdue* dans une génératrice ou dans un moteur.

Ces trois grandeurs, puissance absorbée P_t, puissance utile P_u, puissance perdue p, sont liées par la relation :

$$P_t = P_u + p.$$

Le rendement d'une génératrice pour laquelle on connaît P_u et p est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}.$$

Le rendement d'un moteur pour lequel on connaît P_t et p est :

$$\eta = \frac{P_t - p}{P_t}.$$

Exercice. — *Un groupe moteur-générateur se compose d'un moteur à courant alternatif, de rendement* 0,90, *qui entraîne une dynamo de rendement* 0,80. *Calculer le rendement du groupe.*

Désignons par P_t la puissance absorbée par le moteur, par P_u la puissance débitée par la dynamo. Le rendement du groupe, qu'il faut chercher, est

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}.$$

Soit P la puissance mécanique produite par le moteur, P est aussi la puissance mécanique absorbée par la dynamo.

Multiplions par P le numérateur et le dénominateur du rapport $\eta = \frac{P_u}{P_t}$, sa valeur ne change pas :

$$\eta = \frac{P_u \times P}{P_t \times P} = \frac{P}{P_t} \times \frac{P_u}{P}.$$

1. C'est une faute de nommer rendement le travail ou la puissance fournie par l'appareil.

Le rapport $\frac{P}{P_t}$ est le rendement du moteur, soit 0,90; $\frac{P_u}{P}$ est le rendement de la dynamo soit 0,80; donc $\eta = 0{,}90 \times 0{,}80 = 0{,}72$.

Le rendement du groupe moteur-générateur est égal au produit des rendements des deux machines qui le constituent.

RÉSUMÉ

1. — Dans un récepteur électrique où la tension aux bornes est U *volts*, un courant de I *ampères* produit, en t *secondes*, une énergie :

$$W = UIt \text{ } joules.$$

La puissance du récepteur est

$$P = UI \text{ } watts.$$

2. — Un générateur dont la tension entre les bornes est U *volts* et qui débite I *ampères* fournit une puissance P = UI *watts* et en t *secondes* une énergie W = UIt *joules*.

3. — Le rendement d'un appareil électrique est le rapport de la puissance utile qu'il fournit à la puissance totale qu'il absorbe.

EXERCICES

1. Quel est le prix du fonctionnement pendant une heure d'une lampe électrique de 50 *watts?* La lampe coûte 0,62 F et dure 1 000 *heures*. L'énergie électrique est payée 0,32 F le *kilowattheure*.

Réponse : 0 017 F.

2. Combien coûte le chauffage électrique jusqu'à l'ébullition d'un litre d'eau prise au robinet à 12°? Le rendement de la bouilloire est 0,80, le *kilowattheure est* payé 0,32 F.

Réponse : 0,04 F.

3. Une machine à coudre est entraînée par un moteur électrique de 0,1 *ch* dont le rendement est 0,40. Quelle est la dépense à l'heure quand le *kilowattheure est* facturé 0,32 F.

Réponse : 0,068 F.

4. Une centrale thermique moderne brûle 450 *g* de charbon pour produire 1 *kWh* d'énergie électrique. Le charbon de mauvaise qualité donne en brûlant 7 200 *kcal* par *kilogramme*. Calculer le rendement de la transformation. Vous savez que 1 *kWh* équivaut à 860 *kilocalories*.

Réponse : 0,26.

5. Pour évaluer grossièrement la quantité d'énergie électrique que peut fournir un lac de montagne, on compte qu'un mètre cube d'eau tombant d'une hauteur de 500 mètres produit un *kilowattheure*. Quel est le rendement supposé de la transformation?

Réponse : 0,73.

6. Compléter le tableau suivant, concernant quatre groupes générateurs, en remplaçant les points par les nombres convenables :

MACHINES DE COMMANDE			GÉNÉRATRICE ÉLECTRIQUE			RENDEMENT du groupe η
	P *ch*	P *k*W	U *volts*	I *ampères*	P *k*W	
Turbine à eau	60	. . .	115	305	. . .	
Moteur Diesel	200	. . .	230	525	. . .	
Machine à vapeur	800	. . .	230	2 180	. . .	
Turbine à vapeur	1 570	. . .	460	2 180	. . .	

7. Le tableau suivant est relatif à cinq moteurs électriques; compléter les indications des colonnes :

MOTEURS	PUISSANCE ABSORBÉE			PUISSANCE UTILE		RENDEMENT du moteur η
	U *volts*	I *ampères*	P *k*W	P *chevaux*	P *k*W	
a	110	2,7	. . .	0,27	. . .	. . .
b	110	. . .	0,704	. . .	0,500	. . .
c	. . .	6,7	1,474	1,5	. . .	. . .
d	. . .	60	. . .	15	. . .	0,84
e	220	. . .	. . .	. . .	19,87	0,83

8. Compléter le tableau qui suit :

MACHINES	PUISSANCE ABSORBÉE	PERTES	PUISSANCE UTILE	RENDEMENT η
	chevaux	watts	kilowatts	
Génératrices	. . .	. . .	20	0,80
	. . .	3 000	17	. . .
	10	. . .	6	. . .
	kilowatts	watts	chevaux	
Moteurs	9,2	. . .	10	. . .
	4,6	920	. . .	. . .
	. . .	. . .	0,24	0,60

Applications de l'effet Joule. Chauffage électrique.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie d'accumulateurs de 3 éléments.
Un rhéostat.
Deux fils fins et nus en cuivre.
Une épissure soigneusement exécutée.
Un coupe-circuit à tabatière.
Un coupe-circuit à broches.
Une bilame.
Un fer à repasser électrique.

LEÇON

A. — Quelques inconvénients de l'effet Joule.

1. L'échauffement des machines électriques limite leur puissance.

Cet échauffement est causé en grande partie par la chaleur Joule dégagée par le courant qui passe dans les enroulements de la machine.

Par exemple, quand on fait fonctionner un moteur électrique à sa charge normale, sa température augmente d'abord assez vite, puis plus lentement. Au bout de trois ou quatre heures de marche, s'il s'agit d'un moteur de quelques chevaux, la température cesse de croître. L'état stationnaire est atteint quand le moteur perd dans l'air qui l'entoure toute la chaleur que le courant continue à lui apporter.

Or, dans la construction des machines, on emploie des matériaux, tels que du coton, du papier et du carton, du vernis, de la soudure à l'étain, qui se détériorent quand ils sont maintenus quelque temps à une température un peu élevée. Il faut donc limiter le courant et par suite la puissance de la machine à une valeur telle que la température maximum atteinte dépasse seulement de 60° environ la température ambiante.

Pour obtenir une puissance plus élevée sans accroître les dimensions des machines qu'ils fabriquent, les constructeurs les munissent de *dispositifs de refroidissement*. Ce sont des *ventilateurs* dans les machines tournantes, (voir figure 8, 27e leçon). Certaines machines, comme les transformateurs, n'ont aucune partie mobile, on les fait fonctionner dans des *cuves pleines d'huile* et l'huile est refroidie par de l'eau qui circule dans des serpentins.

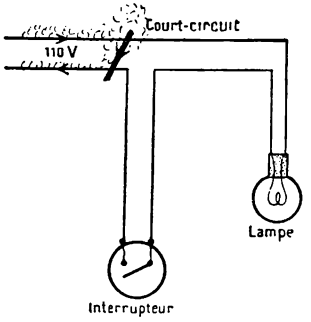


FIG. 1. — Un **court-circuit** cause un échauffement excessif des conducteurs et peut provoquer un incendie.

2. Un court-circuit cause parfois un incendie.

Il y a **court-circuit** quand deux conducteurs, entre lesquels existe une tension électrique, viennent directement en contact. Si la tension est importante, un courant intense s'établit dans les conducteurs et peut les chauffer au rouge; ils enflamment alors les matières combustibles qu'ils touchent (fig. 1).

3. Les mauvais contacts constituent une autre cause d'accidents.

Plions en un crochet très court une extrémité de deux fils fins de cuivre ou de fer, accrochons les deux fils l'un à l'autre (fig. 2).

Dans le conducteur ainsi formé, faisons passer un courant que nous faisons croître en manœuvrant un rhéostat. Vous constatez que la région du contact défectueux rougit avant le reste des fils.

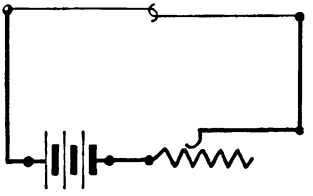


FIG. 2. — Échauffement anormal dû à un **mauvais contact** entre deux portions d'un conducteur.

C'est que le contact est très résistant et que l'effet Joule y est, de ce fait, plus important que dans les autres régions des fils.

Si dans la suite des conducteurs d'un circuit électrique, une jonction entre deux portions consécutives est mal faite (épissure défectueuse, borne non serrée), le résultat de notre expérience risque de se reproduire, dangereusement.

FIG. 3. — **Epissure correcte.** Il faut l'isoler avec un ruban caoutchouté ou *chatterton*.

La figure 3 représente une épissure correctement effectuée.

B. — Quelques utilisations de l'effet Joule.

4. On protège avec des fusibles les lignes électriques et les appareils qu'elles alimentent.

a) Les fusibles les plus simples sont des fils d'alliage de plomb et d'étain, longs de quelques centimètres, que l'on intercale dans les lignes d'une installation électrique à leur départ de la canalisation principale. Lorsque le courant est normal, leur température est inférieure à la température de fusion; si le courant devient trop grand, ils fondent et le circuit est coupé (fig. 4).

Pour 2 *ampères*, on emploie un fil de 0,5 *millimètre;*
— 6 — 1 —
— 20 — 2 —

b) Dans les installations soignées, les fusibles consistent en un fil

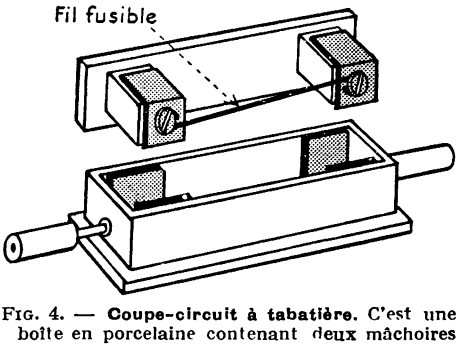


FIG. 4. — **Coupe-circuit à tabatière.** C'est une boîte en porcelaine contenant deux mâchoires en laiton; le couvercle porte deux contacts que l'on réunit par un fil de plomb et qui se placent dans les mâchoires.

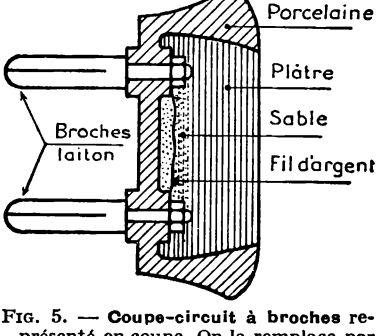


FIG. 5. — **Coupe-circuit à broches** représenté en coupe. On le remplace par un neuf quand le fil d'argent est fondu.

fin d'argent, tendu entre deux broches, entouré de sable dans une enveloppe en porcelaine (fig. 5). La fusion se produit pour une intensité mieux déterminée et, à cause de la faible masse de métal fondue, n'est nullement dangereuse. A chaque calibre de fusible correspond un certain diamètre de broche, de sorte que l'on ne peut remplacer un fusible sur son embase en porcelaine que par un autre de même calibre.

Les fusibles standardisés sont construits pour les courants d'*intensités nominales* suivantes :

2 — 4 — 6 — 10 — 15 — 20 — 25 — 30 — 40 — 50 — 60 *ampères.*

Ils sont utilisables jusqu'à 250 *volts* ou 500 *volts*.

Leurs conditions de fonctionnement sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Courant nominal des fusibles *(ampères)*	Multiples du courant nominal supportés pendant :				
	1 heure au moins	1 heure au plus	10 secondes au moins	10 secondes au plus	20 secondes au plus
2 — 4 — 6	1,5	2,1	1,75	3	
10	1,5	1,9	1,75	3	
15 — 20 — 25	1,4	1,75	1,75	3	
30 — 40 — 50 — 60	1,3	1,6	1,75		3

Vous voyez que *les fusibles ne sont pas précis.* Ils ne protègent pas les appareils contre des surintensités modérées qui suffisent parfois pour échauffer les enroulements à une température produisant leur destruction.

Il est imprudent, pour éviter une coupure de courant, de remplacer un fusible par un morceau de fil de cuivre capable de supporter sans fondre un courant de grande intensité.

5. Dans certains appareils électriques, on emploie des bilames pour couper un courant quand la température s'élève.

Une bilame[1] est constituée par deux lames de métaux différents soudées l'une contre l'autre sur toute leur surface; l'un des métaux est à dilatabilité presque nulle, l'autre à grande dilatabilité. L'alliage employé pour la partie peu dilatable est généralement l'*invar*, ferro-nickel à 37 % de nickel; l'autre partie plus dilatable est aussi un acier au nickel, mais de composition différente.

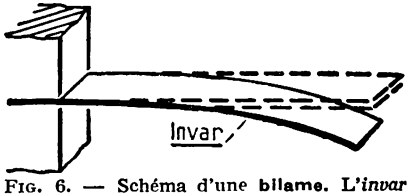


FIG. 6. — Schéma d'une **bilame.** L'*invar* est placé par dessous. La bilame chauffée se courbe comme l'indique la figure.

Soit une bilame droite à la température ordinaire (fig. 6); l'invar est à la face inférieure. Quand la température s'élève, la bilame se courbe, tournant sa face concave vers le bas. Elle prend cette forme

1. Les bilames, comme les fils résistants RNC, sont fabriquées par les Aciéries d'Imphy (Nièvre).

parce que la face supérieure est devenue un peu plus longue que l'autre.

Dans un appareil électrique une bilame est chauffée soit *directement* par le courant électrique qui la traverse, soit *indirectement* par une résistance voisine et quelquefois par la chaleur dégagée dans tout l'appareil.

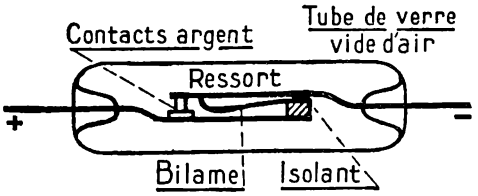


FIG. 7. — **Thermostat à bilame.** La bilame chauffée rompt le contact et coupe le courant. La rupture n'est pas brusque.

La figure 7 représente une bilame enfermée dans un tube de verre vide d'air; quand elle s'échauffe, elle se courbe vers le haut, soulève le ressort formant contact placé dans le circuit et le courant est coupé. La bilame se refroidit, un mouvement inverse se produit et le courant se rétablit.

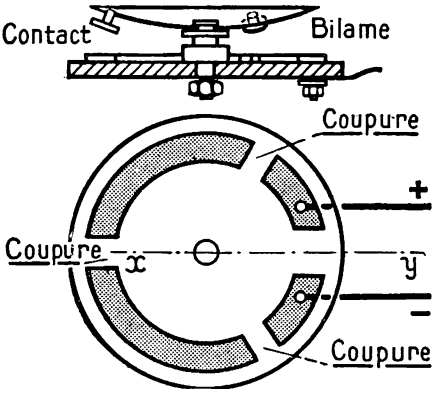


FIG. 8. — **Thermosta à bilame à rupture brusque.** La vue supérieure est la coupe suivant xy. La vue inférieure est la vue par-dessus, bilame enlevée.

Cet appareil, qui est un **thermostat à bilame,** ne rompt pas le courant brusquement. S'il était employé avec un courant quelque peu intense et sous une tension capable de produire des étincelles à la rupture du circuit, les contacts seraient vite détériorés. On l'emploie comme **relais** pour déclencher un interrupteur plus important.

La bilame de la figure 8 produit des ruptures brusques simultanément à trois points du circuit. C'est un disque courbé en forme de calotte; aux températures basses, le métal le plus dilatable constitue la face concave. Quand la température croît et atteint une certaine valeur, la face concave devient convexe; le changement est brusque, les trois contacts que porte la bilame quittent en même temps leur face d'appui et le circuit est coupé en trois endroits. Lorsque la bilame se refroidit, elle reprend aussi brusquement sa forme primitive.

On emploie de tels thermostats dans certains fers à repasser, dans les couvertures chauffantes, etc.

C. — Chauffage électrique.

6. Nature des résistances employées.

La figure 9 indique les zones approximatives d'emploi des différentes résistances de chauffage.

Dans beaucoup d'appareils de chauffage, la température ne dépasse pas 800°; des fils ronds ou plats d'alliages de fer, nickel et chrome sont commodes à utiliser. Le nichrome résiste jusqu'à 1 000°. Des alliages de fer, chrome et aluminium permettent d'atteindre 1 300°(trempe de l'acier rapide).

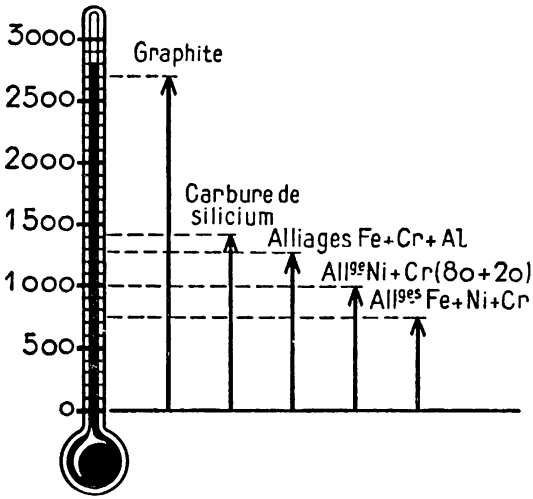


FIG. 9. — Limites approximatives d'emploi des résistances de chauffage.

Pour des températures s'élevant à 1 400° des fours pour traitements thermiques, cuisson de la porcelaine, fusion de quelques métaux ou recourt à des baguettes de carbure de silicium.

De 1 400° à 2 700°, on se sert de graphite en grains, tubes et tiges.

7. Appareils chauffants ménagers.

Ils sont si nombreux que nous n'essayerons pas d'en dresser une liste. Nous en décrirons seulement quelques-uns de construction différente.

a) ***Fers à repasser.*** — Le fil résistant est enroulé sur une plaque d'amiante ou mieux de mica, deux feuilles de mica isolent la plaque chauffante en dessus et en dessous (fig. 10), l'ensemble est placé entre une semelle et un couvercle de fonte. Parfois les fers sont munis d'un thermostat.

La puissance des fers ménagers est souvent 300 *watts;* les tailleurs en utilisent de 500 *watts.*

b) ***Bouilloires.*** — Ce sont des marmites à double fond. Entre les deux fonds est placé le circuit chauffant constitué comme celui d'un

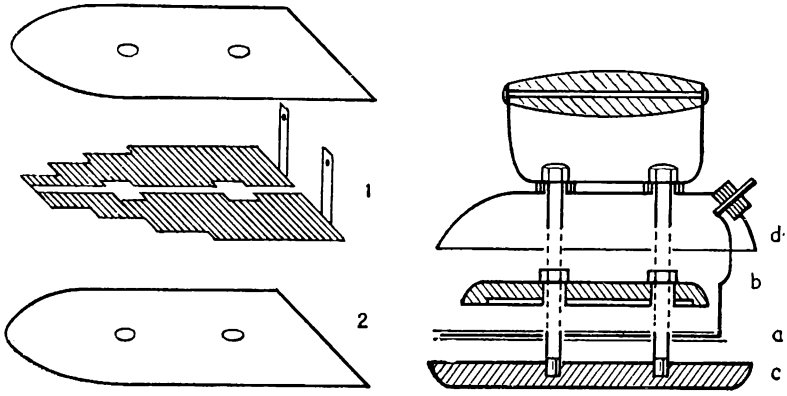


FIG. 10. — **Fer à repasser électrique.**
a) résistance chauffante, figurée en 1 et placée entre deux feuilles de mica 2;
b et *c)* plaques de fonte;
d) couvercle en tôle.

fer à repasser. Une prise est faite vers le tiers de la résistance, de sorte que la bouilloire possède trois broches.

Le cordon qui l'alimente est muni de trois fiches, deux de ces fiches *b* et *c*, sont réunies au même pôle, la troisième, *a*, marquée d'une façon spéciale, souvent peinte en rouge, correspond à l'autre pôle. En vous reportant à la figure 11, vous chercherez les différentes combinaisons de chauffage qui sont possibles et vous calculerez la puissance en jeu pour

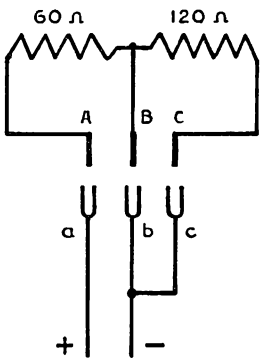


FIG. 11. — Schéma des **résistances d'une bouilloire** et du cordon d'alimentation.

FIG. 12.
Constitution schématique d'une **résistance blindée.**

chacune quand la tension d'alimentation est 120 *volts*.

c) ***Résistances blindées.*** — Le fil résistant est enroulé en boudin

et placé dans un tube métallique rempli de magnésie tassée (fig. 12). La magnésie, oxyde de magnésium, est une poudre comme la chaux, elle conduit la chaleur mais non l'électricité.

Le tube peut être enroulé ou plié. On en fait, par exemple, des thermoplongeurs pour chauffer de l'eau ou de l'huile (fig. 13).

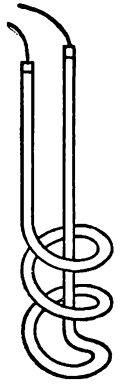


FIG. 13. — **Thermo - plongeur.** Il faut couper le courant quand l'appareil est sorti du liquide à chauffer. Pourquoi ?

d) ***Cuisinières électriques.*** — Une cuisinière de ménage rassemble souvent trois plaques chauffantes et un four.

Les *plaques chauffantes*, en fonte, sont creusées sur la face inférieure d'une gorge en spirale dans laquelle sont logées une ou deux résistances blindées. En consommant 600 ou 1 500 *watts* par plaque, on porte la fonte à 300 ou 600°. Il est recomandé d'employer avec ces plaques des marmites et casseroles à fond épais de 4 à 8 *millimètres* et bien plats pour être en contact sur toute leur surface avec les plaques chauffantes.

Le *four* possède deux chauffages, l'un pour la voûte (1 200 à 1 500 *W*), l'autre pour la sole (800 à 1 200 *W*). La température moyenne est de 250 à 300°.

La puissance totale d'une telle cuisinière est de l'ordre de 6 *kilowatts*, mais en pratique on n'utilise que 1 *kilowatt* pendant 1 500 *heures* par an. Pour la cuisine électrique, l'Électricité de France consent un tarif réduit et livre le *kilowattheure* à un prix qui est environ les deux tiers de celui appliqué à l'éclairage.

e) ***Chauffe-eau à accumulation.*** — C'est un réservoir cylindrique en acier, bien calorifugé, d'une capacité de 75 à 100 *litres*. Un tuyau amène l'eau froide à la partie inférieure, l'eau chaude est prise à la partie supérieure. Le chauffage est effectué par un thermo-plongeur. Un ther-

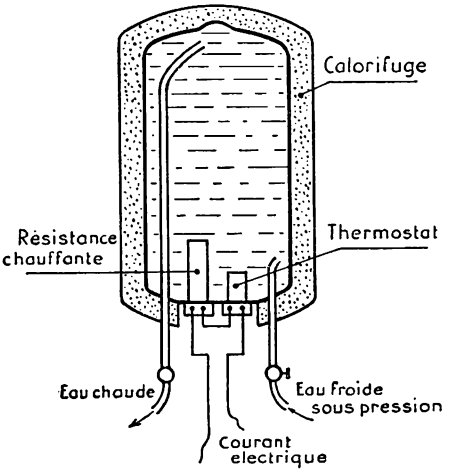


FIG. 14. — **Chauffe-eau à accumulation.** L'eau froide arrive à la partie inférieure de l'appareil, l'eau chaude est prise à la partie supérieure. Pourquoi ?

mostat maintient la température aux environs de 90c (fig. 14 et 15).

Un compteur à mouvement d'horlogerie fournit du courant au chauffe-eau seulement la nuit et de midi à 14 heures. Pendant ces périodes, dites *heures creuses*, la consommation d'énergie électrique pour la force motrice et l'éclairage est réduite, les génératrices des centrales électriques tournent à faible charge et mauvais rendement, la fourniture de courant, même à bas prix, est alors intéressante pour le producteur de courant.

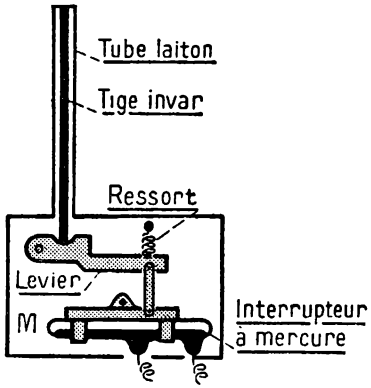


FIG. 15. — Schéma de **thermostat de chauffe-eau.** Quand la température s'élève, le tube de laiton se dilate, la tige d'invar ne change pas de longueur. Le ressort tire le levier et fait basculer l'interrupteur à mercure : le courant est coupé. La température s'abaisse et le mouvement inverse se produit. L'écart de température est environ 20°.

8. Chauffage des appartements.

La puissance à fournir pour chauffer électriquement un local est de l'ordre de 40 *watts* par mètre cube. On emploie des :

1° Radiateurs à chauffage direct. — Les uns sont *lumineux*, le fil chauffant est porté au rouge. Leur puissance ne dépasse pas 2 000 *watts*. D'autres sont *obscurs* et la température du fil chaud y est d'environ 500°. On en fabrique de 4 000 *watts*.

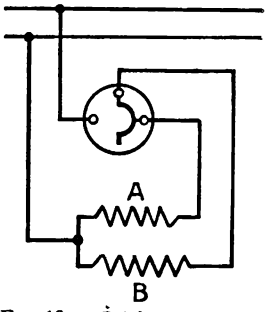


FIG. 16. — **Schéma de branchement d'un radiateur et de son interrupteur.** De combien d'allures de chauffage dispose-t-on quand les résistances A et B ont des valeurs différentes?

Les radiateurs à chauffage direct possèdent en général deux résistances que l'on peut mettre en service, soit en série, soit isolément, soit en parallèle (fig. 16).

Ils sont habituellement branchés sur la ligne d'éclairage, ils consomment de l'énergie électrique à prix élevé et leur fonctionnement coûte cher. Aussi ne les emploie-t-on guère que comme appoint, pour renforcer un autre mode de chauffage temporairement insuffisant (chambre de malade, cabinet de toilette...).

2° Radiateurs à accumulation. — Ils ne sont alimentés que pendant les heures creuses en énergie électrique à tarif réduit.

La chaleur produite dans les résistances est accumulée dans des pierres artificielles ou

des blocs de fonte (fig. 17). La température de ces matériaux monte jusqu'à 500°. Le radiateur est calorifugé pour réduire les pertes de chaleur prématurées.

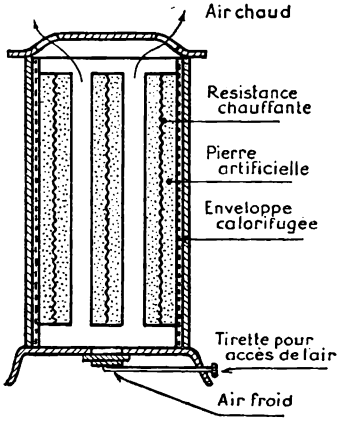


FIG. 17. — Coupe simplifiée d'un radiateur à accumulation.

Dans la journée, on ouvre une vanne à la partie inférieure du radiateur : un courant d'air circule autour des parties chaudes de l'appareil et diffuse la chaleur dans la pièce à chauffer.

9. Conclusion.

Les appareils de chauffage électrique sont propres, faciles à régler et d'excellent rendement. Mais la chaleur obtenue par transformation de l'énergie électrique est coûteuse. Vous savez que 1 *kilowattheure* n'équivaut qu'à 860 *kilocalories*. Le chauffage électrique, tant industriel que domestique, est un chauffage de luxe.

RÉSUMÉ

1. — La chaleur Joule produite par le courant électrique échauffe les machines électriques et limite leur puissance.
Les courts-circuits, les mauvais contacts, provoquent parfois des incendies.

2. — On protège les installations électriques avec des coupe-circuit fusibles. Les bilames servent à fabriquer des thermostats.

3. — On construit des appareils de chauffage domestiques ou industriels avec des fils d'alliages résistants, des résistances en carbure de silicium ou en graphite.
Beaucoup d'appareils électro-ménagers, tels que fers à repasser, bouilloires, cuisinières électriques, chauffe-eau, utilisent la chaleur Joule.

EXERCICES

1. Faire le schéma d'un appareil avertisseur d'incendie comprenant une bilame, une sonnerie électrique et une pile. La sonnerie fonctionne quand la température ambiante atteint 50°.

2. Pour réparer un fer à repasser électrique, on a enlevé 1/10 de la longueur du fil chauffant qui était détérioré. Le fer chauffe-t-il moins ou plus après cette réparation? Justifier et préciser la réponse.

3. Pour un bain, il faut 75 *litres* d'eau à 85°. Que coûte le chauffage électrique de cette eau, sachant qu'elle est fournie à 10° au chauffe-eau, que le *kilowattheure* est payé 0,3 F et que le rendement de l'installation est 0,80?

Réponse : 2,45 F.

4. Sur la plaque d'un fer à repasser, on lit « 110 *V*, 300 *W* ». Quelle est en ohms la résistance du fil chauffant? Que devient la puissance du fer quand la tension d'alimentation s'élève à 120 *V*?

Réponses : 40 *ohms* — 357 *watts.*

5. Pour chauffer un appartement, il faut 40 *W* par mètre cube. Combien coûte par jour le chauffage d'un bureau de 4 × 5 × 3 *mètres*, pendant 8 *heures* quand le prix du *kilowattheure* est 0,25 F?

6. Un chauffe-eau de 100 *litres* est muni d'un thermo-plongeur de 1 200 *watts.* Ce dispositif de chauffage est-il suffisant pour porter à 85° l'eau du chauffe-eau prise à la distribution à 10° en utilisant le courant pendant les 8 heures creuses de la nuit? Un peu de chaleur est perdue malgré le calorifugeage : on admettra un rendement de 0,80 pour l'installation. Un kilowattheure équivaut à 860 kilocalories.

Réponse : il faut 9 375 *kilocalories, le thermo-plongeur n'en fournit que* 8 256.

7. Une bouilloire électrique, fonctionnant sous la tension de 115 *V*, porte à l'ébullition, en 15 *minutes*, un litre d'eau pris à 12°. Son rendement est 0,80.

Calculer :

1° le courant absorbé;

2° la valeur en ohms de la résistance chauffante;

3° la puissance absorbée par la bouilloire.

Réponses : 4,44 *A* — 26 Ω — 511 *W.*

8. Un gros transformateur débite une puissance de 65 000 *kW* avec un rendement de 0,93.

Évaluer la puissance perdue :

1° en kilowatts;

2° en kilocalories par seconde.

La chaleur produite est évacuée par un courant d'eau qui entre dans les réfrigérants à 13° et en sort à 28°. Calculer le débit de ce courant d'eau en litres par seconde.

Réponses : 4 892 *kW* — 1 170 *kcal/s* — 78 *l/s.*

Éclairage électrique par incandescence.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une lampe monowatt.
Une lampe demi-watt.
Une lampe au krypton.
Une collection de commutateurs.

LEÇON

A. — Lampes et appareillage.

Les lampes à incandescence actuelles sont faites d'un filament de tungstène dans le vide ou dans un gaz chimiquement inerte.

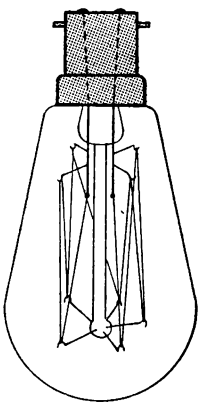


FIG. 1. — **Lampe monowatt à filament de tungstène dans le vide.**

1. Les lampes à filament de tungstène dans le vide sont dites « monowatt ».

Le *tungstène* est un métal rare, difficile à fabriquer, difficile à étirer en fil. Sa propriété caractéristique est sa température de fusion très élevée : 3 385°.

Le filament d'une lampe est très fin : son diamètre est de l'ordre de 0,05 *millimètre*, sa longueur est d'environ 50 *centimètres*. Il est tendu en zigzag sur un support en verre et en fil de nickel dans une ampoule en verre vide d'air (fig. 1). Les extrémités du filament sont soudées à des fils plus gros en acier au nickel qui traversent le verre et aboutissent soit à deux pastilles de laiton scellées sur le culot de la lampe et isolées l'une de l'autre (*culot à baïonnette*), soit à une pastille et à une grosse vis en laiton mince enveloppant le culot (*culot à vis*).

Le courant porte le fil à une température de 2 200°.

Le fil incandescent donne environ une **candela** par 1,5 *watt* consommé.

On fabrique de telles lampes, dites **monowatt**, jusqu'à 60 *watts*.

2. L'ampoule des lampes type « demi-watt » renferme de l'azote, de l'argon ou du krypton.

Pour obtenir plus de lumière par watt consommé, il faut chauffer le filament à une température plus élevée. Mais, dans le vide, le filament incandescent s'évapore et s'use. L'évaporation est plus rapide quand la température est plus haute. Pour la ralentir, on a imaginé d'enrouler le filament en un boudin de faible diamètre à spires très serrées et de remplir l'ampoule de gaz chimiquement inertes, azote, argon et krypton[1], à une pression d'environ 0,5 *bar* (fig. 2).

Ces lampes à atmosphère gazeuse, dans lesquelles la température du filament atteint 2 700°, consomment environ moitié moins par **candela** que les lampes à filament de tungstène dans le vide. Elles sont dites **demi-watt.**

On en fabrique depuis 25 jusqu'à 1 500 *watts*.

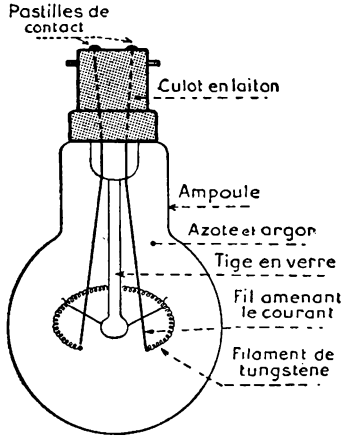


FIG. 2. — **Lampe demi-watt** à filament de tungstène boudiné à pas serré et ampoule contenant de l'azote, de l'argon ou du krypton.

3. Le nombre de watts nécessaires pour produire une candela dépend :

1° ***de la puissance des lampes.***

Avec des *lampes à atmosphère gazeuse* à 110 *volts*, pour obtenir une bougie, il faut

puissance en watts de la lampe	25	40	60	100	200	500	1 500
watts par candela[2]	1,5	1,34	1,17	1,06	0,95	0,82	0,73

Vous remarquez :

que les grosses lampes consomment, par candela, moins que les petites;

que l'expression *demi-watt* n'est pas justifiée techniquement ; c'est un qualificatif commercial.

1. Dans un litre d'air atmosphérique il y a 9,4 cm^3 d'argon et 0,001 5 cm^3 de krypton, avec d'autres gaz tels que l'hélium et le néon. On les obtient quand on distille l'air liquide pour en extraire l'oxygène.

2. La *candela* est l'unité d'intensité lumineuse, elle est définie dans la 17e leçon.

2° ***de la tension nominale des lampes.*** Pour produire une candela on consomme dans les lampes à 220 volts :

puissance en watts de la lampe	25	40	60	100	200	500	1 500
watts par candela	1,72	1,60	1,47	1,23	1,05	0,91	0,79

Ces lampes sont donc moins avantageuses que celles à 110 *volts*.

Signalons que la transformation d'énergie électrique en énergie lumineuse, avec pour intermédiaire l'énergie calorifique, est effectuée dans les lampes à incandescence avec un mauvais rendement. Pour produire une candela, il faut en effet consommer au moins 0,73 *watt*; or la puissance lumineuse d'une candela évaluée en watt vaut seulement 0,02 *watt*. Le rendement de la transformation n'est que : 0,02 : 0,73 = 0,027; beaucoup trop de chaleur, trop peu de lumière; des progrès sont possibles.

4. Pour une lampe déterminée, la lumière produite varie beaucoup avec la tension aux bornes.

Voici le nombre de candelas que l'on obtient avec une lampe de 100 *watts* 110 *volts*, pour différentes tensions aux bornes :

tension en volts aux bornes	90	100	104	110	116	120
nombre de candelas produites	43	67	78	95	111	124

La puissance lumineuse varie dans le même sens que la tension aux bornes, mais plus vite que la tension.

Il en résulte que, pour un bon fonctionnement d'une installation d'éclairage, *on ne peut tolérer une chute de tension en ligne supérieure à* 3 %.

D'autre part, il est possible de calculer qu'à une augmentation de 5 % de la tension aux bornes de la lampe correspond une augmentation de 10 % de la puissance absorbée et de 17 % de la puissance lumineuse produite.

Il y aurait donc avantage à *survolter* une lampe, c'est-à-dire à l'employer à une tension supérieure à sa tension nominale, si le survoltage ne réduisait beaucoup sa durée. Une lampe employée à sa tension nominale dure environ 1 000 *heures*; survoltée de 5 %, elle ne dure que 500 heures; sous-voltée de 5 %, elle peut durer 2 000 heures.

5. On emploie rarement les lampes nues.

a) Une lampe nue émet de la lumière dans toutes les directions, mais la répartition n'en est pas uniforme à cause de la disposition du filament. On représente cette répartition par une courbe telle que celle de la figure 3

dans laquelle la longueur d'un rayon partant de la lampe est proportionnelle à l'intensité lumineuse dans cette direction.

Il y a intérêt à envoyer le plus de lumière possible sur le plan où elle est utilisée. On emploie pour cela des **réflecteurs** en tôle émaillée (fig. 4), en métal poli, en verre argenté ou taillé. Les réflecteurs sont dits **extensifs** quand ils renvoient la lumière en un faisceau large, **intensifs** quand le faisceau est étroit (fig. 5).

Ce mode d'éclairage se nomme **éclairage direct.** Il s'impose quand on ne peut compter sur le plafond ou les parois du local éclairé pour diffuser la lumière qu'ils reçoivent.

b) Le filament d'une lampe allumée est très brillant [1] : il éblouit. Pour éviter l'éblouissement, on loge la lampe dans un **diffuseur** en verre opalin qui le cache à la vue. Ce n'est plus le filament qui éclaire directement, mais le diffuseur de grande surface; toutefois le diffuseur absorbe une partie de la lumière émise par la lampe.

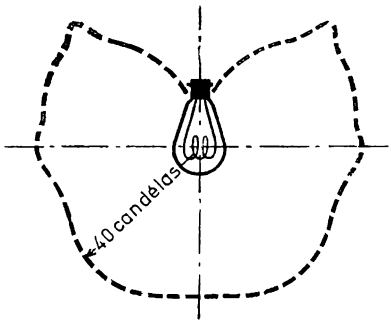


FIG. 3. — **Courbe de répartition** de la lumière émise par une lampe demi-watt.

Le verre d'un diffuseur est fabriqué plus ou moins translucide. En donnant à l'appareil une forme convenable, en le constituant de plusieurs pièces en verre translucide de qualités différentes, on réalise des répartitions diverses de la lumière. On obtient ainsi :

un éclairage semi-direct (fig. 6), où la plus grande partie de la lumière est dirigée vers le bas; les ombres sont moins dures qu'avec un éclairage direct;

un éclairage semi-indirect (fig. 7), où beaucoup de lumière est dirigée vers le plafond ou les murs; les ombres produites sont douces;

un éclairage indirect (fig. 8), où la totalité de la lumière est envoyée vers le plafond et le haut des parois de la pièce éclairée. Le local doit être peint d'un ton aussi clair que possible; la lumière est renvoyée dans toutes les directions par le plafond et les murs, elle ne produit pratiquement pas d'ombres. Ce mode d'éclairage convient pour les bureaux de dessin technique.

---

1. On nomme **brillance** ou **luminance** d'une source de lumière dans une direction donnée, le quotient de l'intensité lumineuse en candela dans cette direction par la surface apparente de la source.

L'unité de brillance est celle d'une source ayant une intensité de 1 candela par mètre carré de surface apparente. A cette unité, on donne le nom de **nit.**

Pour qu'il n'y ait pas éblouissement, la brillance d'une source ne doit pas dépasser 5 000 *nits*.

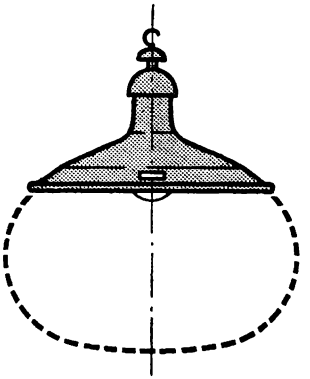


FIG. 4. — **Réflecteur extensif** en tôle emaillée.

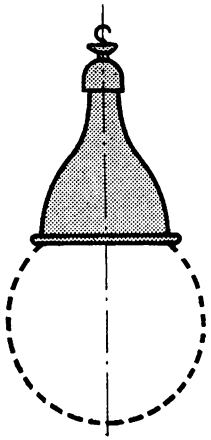


FIG. 5. — **Réflecteur intensif** en tôle émaillée.

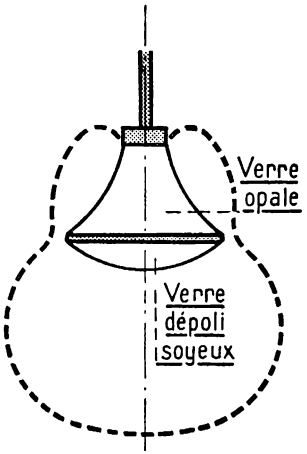


FIG. 6. — **Diffuseur** pour éclairage semi-direct.

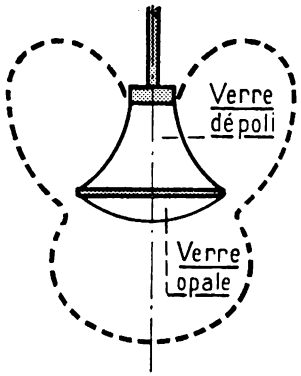


FIG. 7. — **Diffuseur** pour éclairage semi-indirect.

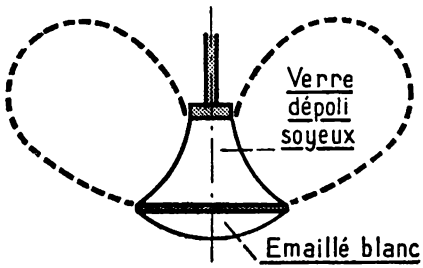


FIG. 8. — **Diffuseur** pour éclairage indirect.

B. — Installations d'éclairage.

6. Examinons l'installation d'éclairage d'un petit appartement.

a) ***Entrée de poste.*** — Le courant est amené par deux fils dans l'appartement, soit à partir d'une ligne aérienne passant à proximité de l'immeuble, soit à partir de la *colonne montante* établie en général dans la cage d'escalier et reliée à sa partie inférieure au câble sous plomb d'une distribution souterraine.

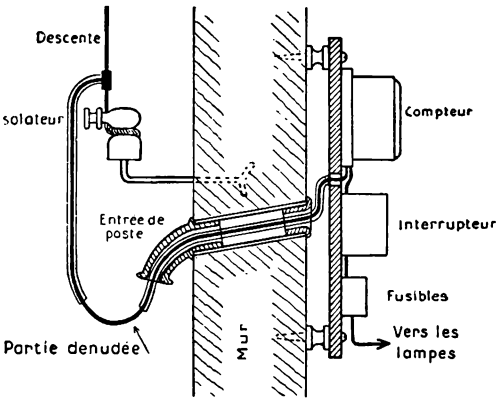


FIG. 9. — **Entrée de poste** aérienne avec tableau d'abonné. Le second fil de ligne entre de la même façon, à 15 ou 20 *cm* du premier.

La figure 9 est le schéma d'une entrée de poste aérienne. Deux conducteurs venant de la ligne, et amarrés chacun à un isolateur de descente, traversent le mur par un trou garni d'une pipe d'entrée en porcelaine, d'un tube isolant et d'un manchon de sortie. Ils aboutissent au *compteur* sur le *tableau d'arrivée*, puis à l'*interrupteur général* et aux *coupe-circuit généraux*.

b) ***Ligne principale.*** — Branchée sur les coupe-circuit du tableau d'arrivée, elle gagne le centre de l'appartement où sont groupés les coupe-circuit de départ des lignes secondaires.

c) ***Lignes secondaires.*** — Un branchement comprend dans le cas le plus simple, à partir du fil positif de la ligne principale, un *coupe-circuit* de départ, un *interrupteur* unipolaire à rupture brusque, une *lampe*, un *coupe-circuit* de retour.

Vous remarquerez que l'interrupteur est monté sur le pôle positif. Dans le cas d'une installation à courant alternatif on place l'interrupteur sur le *fil de phase;* l'autre fil, dit *fil neutre*, est mis à la terre à la cabine de transformation du secteur. Cette place de l'interrupteur est choisie pour que la tension par rapport à la terre de la plus grande partie de l'installation soit la plus faible possible et assurer ainsi la sécurité des usagers.

d) La figure 10 montre une ligne alimentant une *prise bipolaire* de courant sur laquelle on branche temporairement des récepteurs mobiles tels que fer à repasser, radiateur, aspirateur de poussières, appareil de T. S. F. qui sont munis d'une prise à deux broches.

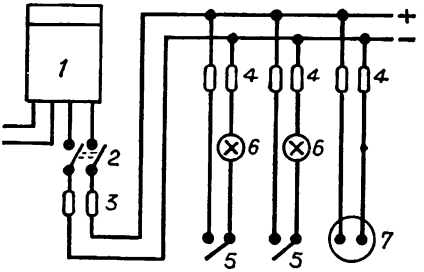


FIG. 10. — Schéma de l'**installation d'éclairage** d'un appartement.

Les prises de courant jusqu'à 5 *ampères* n'ont pas d'interrupteur.

7. Appareillage de commande des lampes à incandescence.

Outre les interrupteurs unipolaires, qui sont les plus employés, on trouve dans le commerce des **commutateurs** qui rendent possibles toutes les combinaisons d'allumage de lampes.

On désigne chacun de ces commutateurs par un numéro en chiffres romains. En voici la liste :

Fonctions remplies par les commutateurs	Désignation du commutateur	Numéro de référence	Schémas correspondants
Allumage de lustres	Commutateur à deux directions différentes et marche en parallèle	I	fig. 11
Allumer ou éteindre séparément d'un seul endroit deux lampes ou deux groupes de lampes	Commutateur à deux directions avec arrêt	II	fig. 12
Va-et-vient. Allumer et éteindre une lampe ou un groupe de lampes de deux endroits différents	Commutateur à deux directions sans arrêt	III	fig. 13
Allumer ou éteindre successivement trois lampes ou groupes de lampes d'un seul endroit	Commutateur à trois directions pour simple, double et triple allumage	IV	fig. 14

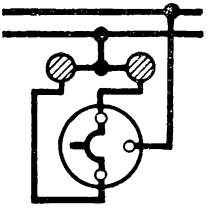


FIG. 11.
Commutateur I.

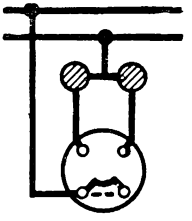


FIG. 12.
Commutateur II.

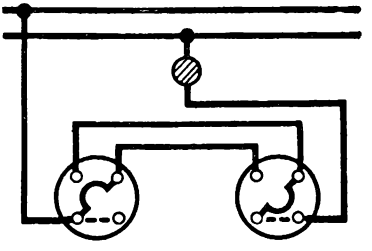


FIG. 13.
Commutateur III. Va-et-vient.

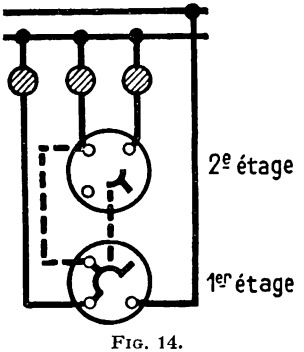


FIG. 14.
Commutateur IV.

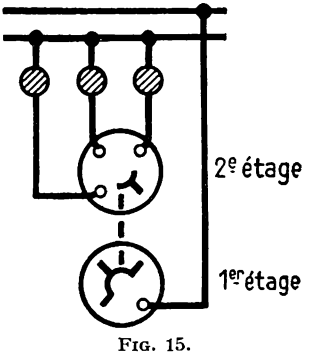


FIG. 15.
Commutateur V.

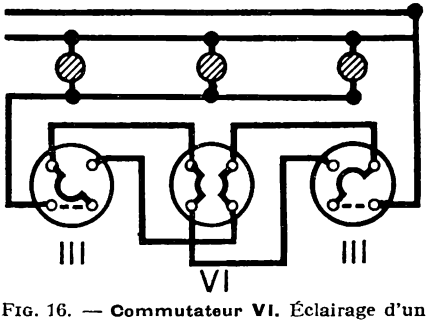


FIG. 16. — **Commutateur VI.** Éclairage d'un escalier avec deux commutateurs III aux extrémités de l'installation.

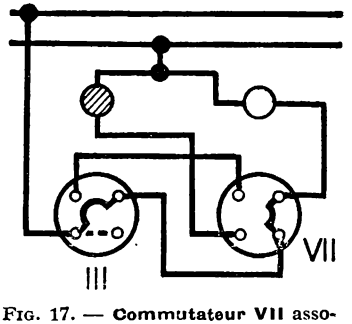


FIG. 17. — **Commutateur VII** associé à un commutateur III pour éclairage d'une chambre d'hôtel.

Fonctions remplies par les commutateurs	Désignation du commutateur	Numéro de référence	Schémas correspondants
Allumer ou éteindre d'un seul endroit trois lampes ou groupes différents de lampes	Commutateur à trois directions	V	fig. 15
Éclairage d'un escalier. Allumer ou éteindre des lampes d'un nombre quelconque d'endroits	Commutateur inverseur (avec deux commutateurs III à deux directions sans arrêt aux deux extrémités)	VI	fig. 16
Éclairage d'une chambre d'hôtel. Allumer ou éteindre séparément deux lampes de deux endroits différents	Commutateur pour chambre d'hôtel (associé à un commutateur III à deux directions sans arrêt)	VII	fig. 17

Les schémas que nous en donnons ne les représentent que dans une seule position. Vous les dessinerez dans les autres positions et vous suivrez le trajet du courant dans chaque cas.

Les commutateurs IV et V sont à deux étages. Leurs connexions intérieures sont figurées en pointillé. Les contacts mobiles sont entraînés par le même axe ; ils tournent ensemble et du même angle.

RÉSUMÉ

1. — Les lampes à incandescence actuellement employées sont du type *monowatt* à filament de tungstène dans le vide, ou du type *demi-watt* à filament de tungstène boudiné dont l'ampoule contient de l'azote, de l'argon ou du krypton.

Les lampes à filament de tungstène dans une atmosphère gazeuse dont le filament est à température plus élevée fournissent plus de lumière que les lampes à filament de tungstène dans le vide pour une même consommation d'énergie électrique.

2. — Les lampes pour installations à tension peu élevée ont un meilleur rendement que les autres.

La puissance lumineuse fournie par une lampe varie dans le même sens que la tension aux bornes, mais plus vite que la tension.

3. — On emploie les lampes avec des *réflecteurs* ou des *diffuseurs*.

4. — Des commutateurs normalisés servent à réaliser les combinaisons usuelles d'allumage des installations.

EXERCICES

1. Quelle est la résistance, à la température de fonctionnement, d'une lampe de 60 *watts*, 110 *volts*?

Quelle est sa résistance à froid (15°), en supposant que la température du filament de la lampe en fonctionnement est 2 600° et que le coefficient de température du tungstène est 0,004 5 à toute température?

Réponse : 201 *ohms* — 18,3 *ohms.*

2. Démontrer qu'une résistance constante R absorbe une puissance $P = U^2 : R$ quand la tension à ses bornes est U.

3. Deux lampes, l'une de 25 *watts*, 110 *volts*, l'autre de 40 *watts*, 110 *volts* sont mises en série et alimentées sous la tension de 220 *volts.*

1° Quelle est la résistance à chaud de chaque lampe?

2° Quelle est le courant qui traverse ces lampes quand elles sont en série sous 220 *volts?* On admet que la résistance des lampes est constante.

3° Quelle est la tension aux bornes de chacune d'elles?

4° Ce montage en série est-il acceptable? Pourquoi?

Réponses : 484 Ω — 302 Ω — 0,28 A — 135,5 V — 34,5 V.

4. La résistivité du tungstène est 0,055 $\Omega.m/mm^2$ et son coefficient de température 0,004 5.

Calculer la longueur du filament de tungstène d'une lampe de 25 *watts*, 110 *volts.* Le diamètre du filament est 0,03 *millimètre* et sa température atteint 2 500° quand la lampe fonctionne.

Réponse : 0,55 *m.*

5. L'installation d'éclairage sous 115 *V* d'une école comporte 150 lampes de 60 *W.*

Quelle est la puissance consommée, le courant absorbé et la résistance de l'installation quand toutes les lampes sont allumées?

Convient-il de les allumer toutes à la fois, avec un seul interrupteur? Pour répondre à cette question, calculer l'intensité atteinte pendant une fraction de seconde, au moment de la fermeture de l'interrupteur. Le filament de tungstène des lampes atteint 2 600° quand elles sont allumées, et le coefficient de température du tungstène est 0,0045.

Réponses : 9 000 *W* — 78,2 *A* — 1,58 Ω — 871 *A.*

6. Une lampe de 200 *candelas* est placée dans un diffuseur sphérique. Quel doit être au moins le diamètre du diffuseur pour que la brillance de l'appareil ne dépasse pas 0,5 *candela* par cm^2 de surface apparente? La surface apparente du diffuseur est celle d'un cercle ayant même diamètre que le diffuseur.

Réponse : 23 *cm.*

Éclairage électrique par incandescence (suite).

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Les expériences photométriques doivent être faites dans une salle obscure. Il n'est pas indispensable d'effectuer celles qui sont décrites dans la leçon. Il faudrait :

cinq bougies ;
deux écrans en papier blanc ;
un écran opaque en papier noir mat.

Un luxmètre *et un* ohmmètre *sont utiles, mais ils sont coûteux.*

LEÇON

C. — Notions de photométrie.

1. Quelques grandeurs photométriques.

Deux bougies ordinaires identiques [1], brûlant de la même façon, ont la même **intensité lumineuse.**

En les rapprochant l'une de l'autre, on obtient une source unique lumineuse dont l'intensité lumineuse est la somme des intensités lumineuses des deux bougies.

Plaçons deux écrans blancs identiques respectivement à la même distance de deux bougies identiques, vous constatez qu'ils paraissent également blancs : on dit que ces écrans ont le *même* **éclairement** (fig. 1).

Inversement, si deux sources lumineuses, qui peuvent être de nature différente, par exemple une bougie et une lampe électrique, placées à des distances égales de deux écrans identiques y produisent le même éclairement, on en conclut que les deux sources ont des **intensités lumineuses égales.**

1. Les bougies sont le plus souvent faites d'*acide stéarique*, matière solide, blanche extraite du suif.

Nous plaçons une bougie en face d'un écran E_1 à 1 *mètre* de distance (fig. 2); en face d'un autre écran E_2, à 2 *mètres* de distance, nous mettons un groupe de 4 bougies. Nous constatons que les éclairements de E_1 et de E_2 sont égaux.

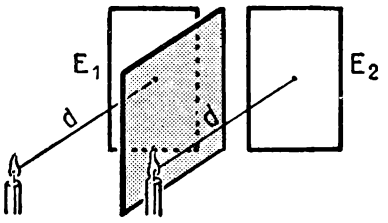


FIG. 1. — L'**éclairement** est le même sur deux écrans placés à la même distance de deux bougies identiques.

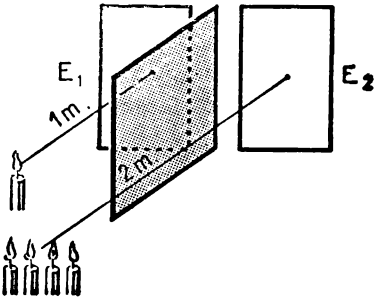


FIG. 2. — **Loi de l'inverse carré.** 1 bougie placée à 1 *mètre* de l'écran donne le même éclairement que 4 bougies placées à 2 *mètres*.

Donc l'éclairement fourni par une bougie à la distance de 2 *mètres* est 4 fois plus faible que celui que produit une bougie à 1 *mètre*. Il serait 9 (ou 3^2) fois plus faible à la distance de 3 *mètres*.

L'éclairement d'une surface par une source lumineuse varie donc en raison inverse du carré de la distance de la surface à la source.

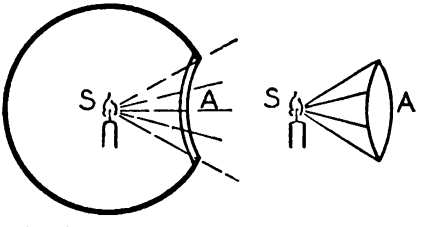


FIG. 3. — Par l'ouverture percée dans la sphère opaque, il sort un **flux lumineux.**

Imaginons une source lumineuse S réduite à un point (fig. 3) et placée au centre d'une sphère creuse, peinte intérieurement en noir mat pour éviter toute réflexion de la lumière. Supposons que l'on ait découpé dans la sphère un panneau mobile A. Quand on enlève ce panneau, il sort par l'ouverture un faisceau divergent de lumière que l'on nomme un **flux lumineux.**

2. Quelques unités photométriques.

Intensité lumineuse. — L'unité légale est la ***candela*** : 1 cm^2 *d'un corps noir porté à la température de solidification du platine a une intensité lumineuse de* 60 *candelas.*

Cette unité est représentée par des lampes électriques à incandescence, étalonnées sous une tension définie, qui sont conservées dans les trois laboratoires nationaux des États-Unis, d'Angleterre et de France.

L'intensité lumineuse d'une bougie ordinaire d'acide stéarique est grossièrement d'une *candela.*

Éclairement. — L'unité d'éclairement est le ***lux.*** *Le lux est l'éclairement d'une surface normale au rayon lumineux à* 1 mètre *d'une source dont l'intensité est* 1 candela.

Flux lumineux. — L'unité de flux lumineux est le ***lumen.*** Pour définir le lumen, considérons la sphère de la figure 3. Supposons que le point lumineux S donne *dans toutes les directions* une intensité lumineuse de 1 *candela,* que la sphère ait pour rayon 1 *mètre,* que la surface du panneau A soit de 1 *mètre carré* : le flux lumineux sortant par l'ouverture est égal à 1 *lumen.*

Le lumen est donc le flux lumineux provenant d'un point lumineux dont l'intensité est 1 *candela et passant dans une surface de* 1 mètre carré *prise sur une sphère de* 1 mètre *de rayon ayant pour centre le point lumineux.*

La surface totale de la sphère est $4\pi R^2 = 12{,}57$ *mètres carrés.* Le flux lumineux total émis par la source de 1 *candela* est donc 12,57 *lumens.*

Vous avez vu dans la leçon précédente que les lampes électriques ne donnent pas la même intensité dans toutes les directions, aussi préfère-t-on les caractériser par leur flux lumineux total en *lumens* plutôt que par leur intensité en *candelas.*

Ainsi une lampe au krypton de 64 *watts,* 115 *volts,* fournit 1 000 *lumens.* Son intensité lumineuse moyenne est 1 000 : 12,57 ≃ 80 *candelas.* Elle produit :

1 000 : 64 = 15,6 *lumens par watt.*

En rapprochant les définitions du *lux* et du *lumen,* vous remarquerez que le *lux* est l'éclairement d'une surface de 1 *mètre carré* qui reçoit un flux lumineux de 1 *lumen.*

3. On mesure un éclairement avec un luxmètre.

L'œil, à cause de sa facilité d'accommodation, n'apprécie que très grossièrement les différences d'éclairement. Aussi les électriciens éclairagistes emploient-ils des instruments nommés **luxmètres** pour mesurer les éclairements que leurs installations réalisent.

Le **luxmètre photoélectrique** est très pratique.

Il se compose d'une *cellule photoélectrique* et d'un *galvanomètre.*

La **cellule photoélectrique** (fig. 4) est faite d'une électrode ou disque en tôle d'acier doux couverte, sur l'une de ses faces, d'une couche de

sélénium[1] cristallisé épaisse d'environ un dixième de millimètre; sur le sélénium est déposée une couche d'or ou de platine, dite contre-électrode, si mince qu'elle est translucide.

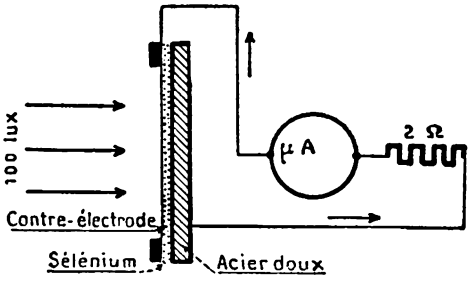


FIG. 4.
Schéma de la constitution d'un **luxmètre.**

Quand le sélénium est éclairé, une f. é. m. s'établit entre l'électrode d'acier et la contre-électrode d'or. Cette f. é. m. est proportionnelle à l'éclairement.

Le **galvanomètre,** qui est un voltmètre très sensible, sert à la mesurer. Il est gradué en *lux*.

L'emploi du luxmètre est fort simple : il suffit de placer la cellule à l'endroit où l'on veut mesurer l'éclairement et de lire l'indication du galvanomètre.

Remarquez que la sensibilité visuelle plus ou moins grande de l'observateur et son habileté expérimentale n'interviennent en rien dans la mesure.

D. — Calcul simplifié d'une installation d'éclairage.

4. Valeur de l'éclairement recommandable dans différents locaux.

L'éclairement à prévoir dépend de la destination des locaux. Voici quelques exemples. Les nombres donnés n'ont évidemment aucune précision, ils n'indiquent qu'un ordre de grandeur.

Appartements.

Salon, salle à manger, chambres à coucher	60 *lux*
Bureau	80 —
Cabinet de toilette	60 —
Vestibule, dégagements	30 —
Débarras	20 —

Locaux commerciaux.

Bureaux de dactylos et de comptables	80 *lux*
Salles de vente (suivant la nature des marchandises)	60 à 100 —

1. Le sélénium est un métalloïde dont les propriétés chimiques sont semblables à celles du soufre. C'est un sous-produit de la fabrication de l'acide sulfurique à partir des pyrites de fer.

Locaux industriels.

Bureaux d'études	80 à 100 *lux*
Mécanique de précision, horlogerie	120 à 200 —
Moyenne mécanique	70 —
Grosse mécanique, fonderies, forges	30 —

5. Influence du plafond, des parois, des réflecteurs ou diffuseurs.

Toute la lumière produite par les lampes n'est pas utilisée. Une partie en est *absorbée* par les réflecteurs ou diffuseurs employés, une autre par les murs et le plafond du local.

On tient compte de ces pertes en utilisant dans un projet d'éclairage des coefficients de rendement tels que ceux du tableau suivant :

Coefficients de rendement des divers modes d'éclairage.

ÉTAT DU PLAFOND et des parois	MODE D'ÉCLAIRAGE			
	DIRECT	SEMI-DIR.	SEMI-IND.	INDIRECT
très clair	0,45 — 0,55	0,40 — 0,50	0,35 — 0,45	0,25 — 0,35
moyennement clair	0,35 — 0,45	0,30 — 0,40	0,25 — 0.35	0,15 — 0,25
sombre	0,20 — 0,35	0,20 — 0,30	0,15 — 0,25	0,05 — 0,15

Répétons qu'il s'agit de coefficients empiriques, sans grande précision.

Pour certains locaux de dimensions anormales, il faudrait aussi tenir compte de leur forme, caractérisée par les rapports de leurs trois dimensions. Nous négligerons ces cas exceptionnels.

6. Nombre de lumens à produire.

Pour une pièce ne s'éloignant pas trop de la forme carrée, le flux Φ *lumens* à produire est :

$$\Phi = \frac{E \times S}{\eta}.$$

E est l'éclairement désiré exprimé en *lux*, S la surface à éclairer en *mètres carrés*, η le rendement suivant le mode d'éclairage choisi et l'état des plafond et parois.

Exemple.

Soit à éclairer un magasin de quincaillerie et le bureau attenant. La figure 5 en donne les dimensions

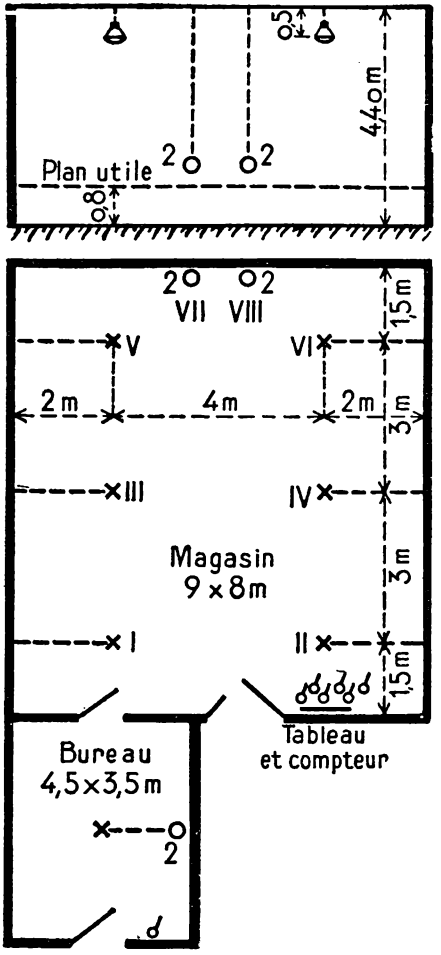


FIG. 5. — Plan sommaire d'un magasin et d'un bureau pour l'étude de leur éclairage.

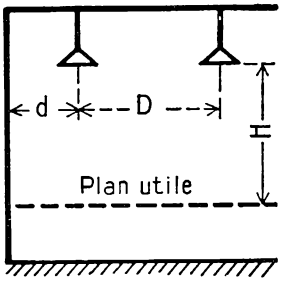


FIG. 6. — Hauteur et distance des foyers lumineux dans le cas de l'éclairage direct ou semi-direct d'un local.
D < 1,5 H $d = D : 2$

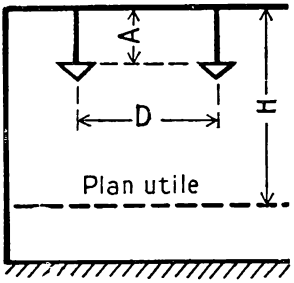


FIG. 7. — Hauteur et distance des foyers lumineux dans le cas de l'éclairage indirect ou semi-indirect d'un local.
D < 1,5 H $A \simeq D$:

Compte tenu des renseignements qui précèdent, nous obtenons le tableau suivant :

LOCAL à éclairer	SURF. S m^2	ÉCLAIREMENT E *lux*	APPAREILS employés	RENDEMENT des appareils et des locaux	LUMENS à produire
Magasin de vente 8 × 9 m^2 plafonds et parois mi-clairs	72 m²	60	Diffuseurs semi-directs	0,35	$\frac{60 \times 72}{0,35} \simeq 12\,400$
Bureau 3,5 × 4,5 *m* plafond et parois clairs	16 m^2	80	Diffuseur semi-indirect	0,40	$\frac{80 \times 16}{0,40} = 3\,200$

7. Hauteur et nombre des foyers lumineux.

Puisque les grosses lampes ont un meilleur rendement que les petites, il faut employer le moins possible de lampes. Mais pour que l'éclairement donné par un foyer sur le plan utile soit à peu près uniforme, le foyer doit être placé à une grande hauteur si la surface à éclairer est grande.

En général, on ne dispose pas de la hauteur suffisante pour une seule lampe, il faut installer plusieurs foyers.

On préconise alors la disposition indiquée par les figures 6 et 7.

Éclairage direct ou semi-direct. — H est la hauteur en *mètres* des lampes au-dessus du plan utile, lequel est souvent à 0,80 *mètre* du sol, D, la distance en *mètres* entre deux foyers voisins; on doit avoir :

$$D < 1,5\ H$$

Si *d* est la distance à la paroi de la ligne d'appareils la plus voisine des murs

$$d = \frac{D}{2} \text{ ou } \frac{D}{3}$$

dans les locaux où l'on travaille près des murs.

Éclairage indirect ou semi-indirect. — H est la hauteur du plafond au-dessus du plan utile. On adopte la valeur précédente $D < 1,5\ H$ pour la distance des foyers et l'on place les diffuseurs à une distance A du plafond telle que :

$$A \simeq D : 6.$$

Exemple.

Dans le cas choisi au paragraphe 6, la hauteur sous plafond du local est 4,40 *mètres*, soit 3,60 *mètres* au-dessus du plan utile.

Dans le *magasin*, les diffuseurs seront mis à 0,50 *mètre* du plafond, donc H = 3,10 *mètres*. La distance entre les diffuseurs sera inférieure à 3,10 × 1,5 = 4,65 *mètres*. On adoptera les dimensions indiquées sur la figure 4. Il y aura 6 lampes de chacune 12 400 : 6 ≃ 2 100 *lumens*.

Dans le *bureau*, une seule lampe suffira pour obtenir 3 200 *lumens*. Le diffuseur sera à une distance A du plafond telle que :

$$A \simeq \frac{D}{6} = \frac{1{,}5\,H}{6} = \frac{1{,}5 \times 3{,}6}{6} = 0{,}90 \text{ } \textit{mètre}.$$

8. Puissance des lampes.

Un tableau des valeurs minimums du flux lumineux que fournissent les lampes neuves usuelles à filament de tungstène en atmosphère gazeuse se trouve à la page 515. Nous y choisissons le modèle de lampe qui fournit au moins le flux lumineux désiré.

Exemple.

La tension du secteur est 110 *volts*. Les lampes qui doivent donner 2 100 *lumens* auront une puissance de 200 *watts*. Pour 3 200 *lumens*, il faudra une lampe de 300 *watts*.

E. — Calcul des lignes d'alimentation.

9. Conditions à réaliser.

Les conducteurs des lignes, tant principales que secondaires, sont à déterminer pour satisfaire aux conditions suivantes :

Solidité mécanique. — Le diamètre minimum autorisé pour les lignes intérieures en cuivre est 1,2 *millimètre*.

Les lignes extérieures doivent avoir un diamètre d'au moins 3 *millimètres*.

Les conducteurs sont protégés en les logeant, soit :

1° les fils d'aller et retour du courant dans un même tube d'acier soudé ou non, garni ou non d'un revêtement intérieur en carton;

2° les deux fils ensemble dans un tube de carton armé de feuillard de tôle d'acier plombé ou d'aluminium;

3° chaque conducteur séparément dans une rainure d'une moulure en bois.

Pour les lignes secondaires passant hors de portée de la main, on tolère l'usage de conducteurs souples torsadés fixés sur de petites poulies en porcelaine.

Isolement électrique. — Les fils et câbles employés dans les installations intérieures sont isolés par du caoutchouc et différents revêtements protecteurs. Vous avez certainement remarqué qu'après quelques années de service le caoutchouc est dur et cassant. Il n'est donc pas possible de déposer de vieux conducteurs pour s'en servir à nouveau.

Pour les installations d'éclairage, on emploie des fils et câbles des séries 750 T et 750 RT. (Le nombre désignant la série indique la tension maximum de service en volts.) Ainsi, les fils 750 T peuvent servir jusqu'à 750 *volts;* ils sont faits d'un conducteur en cuivre étamé [1], d'une enveloppe en caoutchouc vulcanisé et d'une *tresse* de textile. Les fils 750 RT comprennent un fil de cuivre étamé, une enveloppe en caoutchouc vulcanisé, un *ruban* de caoutchouc adhérent et une *tresse* de textile.

Vous trouverez à la page 514 un tableau des diamètres normalisés de ces conducteurs. Ce sont les seuls à utiliser dans une installation.

Les fils souples torsadés sont de la série 250 IF. Ils sont constitués par un câble de fils de cuivre étamés de 0,20 ou 0,25 *millimètre* recouvert d'un guipage de coton, d'une enveloppe de caoutchouc vulcanisé et d'une tresse de textile. On les emploie jusqu'à 250 *volts.*

Résistance électrique. — Vous savez que l'*échauffement* des lignes par effet Joule ne doit pas dépasser 30°. Pour satisfaire à cette condition, le courant doit être inférieur à l'intensité indiquée dans le tableau pour chaque diamètre.

En outre, *la chute de tension depuis le compteur jusqu'au point d'utilisation doit rester inférieure à* 3 % *de la tension nominale de l'installation.* Pour vérifier que cette condition est réalisée, on calcule la résistance de la ligne, le courant qui la parcourt et l'on effectue le produit $u = RI$. Il suffit que ces calculs soient grossièrement approchés par excès.

10. Ordre à suivre dans les calculs.

1° On mesure sur les plans de l'installation les *longueurs* approximatives des différentes lignes prévues. On en trace un schéma très simplifié (fig. 8).

2° On détermine le courant maximal dans chaque ligne.

3° On choisit le *diamètre* de chaque conducteur parmi les diamètres normalisés en tenant compte de la *limite d'échauffement.*

---

1. Le cuivre est toujours étamé quand il doit être en contact avec du caoutchouc vulcanisé, pour empêcher le soufre du caoutchouc vulcanisé de pénétrer dans le cuivre qu'il rend cassant.

4° On calcule la *résistance* de chaque ligne à l'aide de sa résistance kilométrique, puis on détermine la chute de tension $u = RI$ pour l'intensité maximum. Si la chute de tension dépasse la limite autorisée, on remplace le diamètre choisi par le diamètre normalisé immédiatement supérieur, et l'on recommence le calcul de la chute de tension.

Quand plusieurs lignes secondaires ont le même diamètre, il suffit souvent d'étudier la plus longue.

Exemple.

Continuons l'étude de l'installation électrique d'un magasin de vente et du bureau attenant.

En plus des lampes, on installera deux prises de courant bipolaires, sans interrupteurs, dans le magasin, l'une de 10 *ampères*, l'autre de 5 *ampères*, sur la paroi opposée à la porte d'entrée et une de 5 *ampères* dans le bureau.

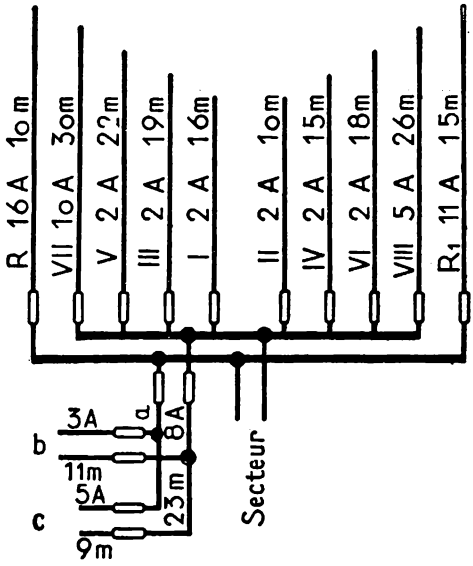


FIG. 8. — Schéma de l'installation d'éclairage du magasin et du bureau de la figure 5.

Dans le magasin, les six interrupteurs et les fusibles seront groupés avec le compteur sur un tableau près de la porte d'entrée. Les 8 fils d'amenée du courant aux appareils, montés sur le pôle positif de l'installation, partiront du tableau et suivront les parois près du plafond, 4 à droite, 4 à gauche du local. Le retour du courant s'effectuera par 2 conducteurs, un de chaque côté de la pièce.

L'installation du bureau ne présente rien de particulier.

Mesurons sur la figure 5 les longueurs des lignes et traçons le schéma figure 8 qui indique tous les éléments du calcul.

Les résultats des opérations sont rassemblés dans les tableaux de la page suivante :

La chute de tension aux bornes des lampes ne doit pas dépasser $110 \times 0{,}03 = 3{,}3$ *volts*. On peut admettre un peu plus aux broches des prises de courant.

L'examen du tableau qui suit montre que la chute de tension dans les lignes VII et R en série qui atteint 4,4 *volts* est trop grande. En donnant à la ligne VII un diamètre de 20/10, cette chute de tension sera ramenée à 3,5 *volts* et admissible.

Il faudra aussi porter à 20/10 le diamètre de la ligne R_1.

Magasin.

Lignes	Courant *ampères*	Diamètre *millimètres*	Longueur *mètres*	Résistance *ohms*	Chute de tension *volts*
I	2	12/10	16	0,25	0,50
II	2	12/10	10	0,15	0,30
III	2	12/10	19	0,29	0,58
IV	2	12/10	15	0,23	0,46
V	2	12/10	22	0,33	0,66
VI	2	12/10	18	0,28	0,56
VII	10	16/10	30	0,26	2,6
VIII	5	12/10	26	0,40	2,0
R	16	20/10	19	0,11	1,8
R_1	11	16/10	15	0,29	3,2

Bureau.

Lignes	Courant *ampères*	Diamètre *millimètres*	Longueur *mètres*	Résistance *ohms*	Chute de tension *volts*
a	8	12/10	23	0,35	2,8
b	3	12/10	11	0,17	0,51
c	5	12/10	9	0,14	0,70

La chute maximum de tension est de 3,5 *volts* à la prise de courant : elle est admissible.

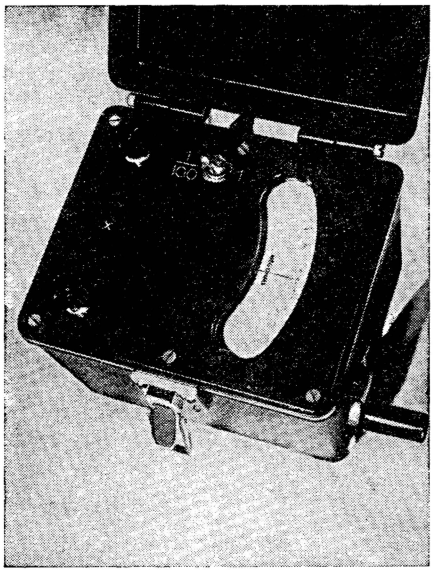
Remarque. — La plupart des petites installations domestiques ne dépassent pas 600 *watts*, soit 6 *ampères* sous 110 *volts*. La chute de tension maximum admissible de 3 % de la tension au compteur, c'est-à-dire 3,3 *volts*, est atteinte avec une ligne de 36 *mètres* en fil de cuivre de 12/10. Donc, en général, ces installations peuvent être exécutées sans qu'une étude analogue à celle qui précède soit utile.

11. Résistance d'isolement d'une installation.

Les isolants qui recouvrent les fils de ligne ou qui supportent les pièces métalliques des appareils ne s'opposent pas de façon absolue au passage du courant d'un pôle à l'autre. Ils sont traversés par un courant très faible. Ce sont de très mauvais conducteurs et non des isolants parfaits.

L'isolement est mesuré entre les conducteurs et la terre et entre les conducteurs. La mesure est effectuée avec du courant continu sous la tension de 500 *volts* au moins, le pôle positif de la source étant relié à la terre dans le cas où l'isolement est mesuré par rapport à celle-ci.

Pendant les mesures, l'installation à vérifier est déconnectée de la source d'énergie qui l'alimente habituellement.



Cliché Chauvin Arnoux.

FIG. 9. — **Ohmmètre à magnéto.**

a) Lorsque la mesure est effectuée par rapport à la terre, les appareils d'utilisation restent branchés et les interrupteurs sont enclenchés.

b) Lorsque la mesure est effectuée entre conducteurs, les appareils d'utilisation sont déconnectés et les interrupteurs sont enclenchés.

La résistance d'isolement de toute partie d'installation comprise entre deux coupe-circuit successifs, ou placée après le dernier coupe-circuit, *doit être au moins égale à* 250 000 *ohms* tant entre conducteurs qu'entre un conducteur quelconque et la terre. La même résistance doit être atteinte entre tout appareil d'utilisation et la terre [1].

On mesure les résistances d'isolement à l'aide d'instruments nommés **ohmmètres** (fig. 9[2]).

RÉSUMÉ

1. — Les unités photométriques sont la *candela*, unité d'intensité lumineuse; le *lux*, unité d'éclairement; le *lumen*, unité de flux lumineux. L'éclairement est mesuré avec un *luxmètre*.

1. Pour toutes les règles d'exécution et d'entretien des installations électriques voir la brochure 11 publiée par l'Union technique de l'Électricité (UTE), 54, avenue Marceau Paris (8e).
2. Voir 47e leçon.

2. — Les diffuseurs absorbent une partie de la lumière produite par les lampes, le plafond, les parois du local éclairé renvoient une partie du flux lumineux qui les frappe.

3. — Quand on exécute une installation d'éclairage, on choisit les conducteurs pour que le courant maximum qui les parcourt ne les *échauffe* pas de plus de 30° et ne produise pas, entre le compteur et le point d'utilisation le plus éloigné, une *chute de tension* supérieure à 3 %.

4. — On mesure la résistance d'isolement d'une installation avec un ohmmètre.

EXERCICES

1. En vous servant des résultats de l'étude d'une installation d'éclairage effectuée au cours de la leçon, calculez la puissance en *watts* nécessaire pour produire un éclairement de 10 *lux* sur le plan utile :

1° dans le magasin;
2° dans le bureau.

2. Déterminer les diamètres des conducteurs de l'installation correspondant

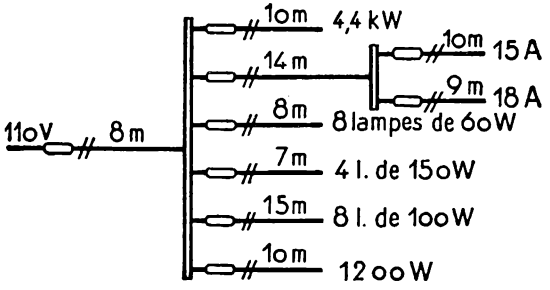


FIG. 10. — Figure pour l'exercice 2. Les deux tirets qui coupent une ligne indiquent qu'elle est bifilaire.

au schéma de la figure 10, en tenant compte des conditions d'échauffement et de chute de tension.

3. Étudier l'installation d'éclairage de l'appartement dont le plan sommaire est donné par la figure 11.

La longueur de l'appartement, soit 14 *mètres*, indique l'échelle du plan. La hauteur sous plafond est 3,60 *mètres*. Les interrupteurs et commutateurs sont placés à 1,30 *mètre* du sol, les prises de courant à 0,50 *mètre*.

La tension est 110 *volts*. Une prise de courant de 5 *ampères* est nécessaire dans

chaque pièce. Dans les chambres à coucher, une prise de courant est prévue de chaque côté de la tête des lits.

Le type de chaque commutateur est indiqué par un numéro en chiffres romains placé près de son symbole.

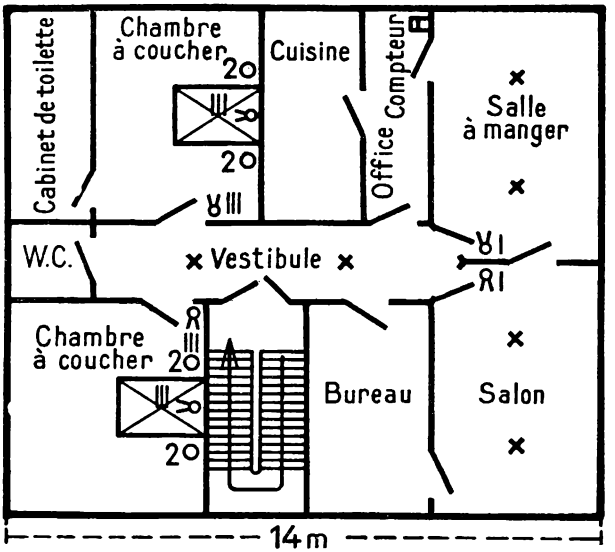


FIG. 11. — Figure pour l'exercice 3. Déterminer son échelle en se servant de la cote indiquée.

Les coupe-circuit sont groupés dans l'office au dessus de la porte d'entrée.

(Se reporter au besoin à la liste des symboles graphiques pour plans d'installations intérieures à la fin du volume.)

Dangers du courant électrique.

LEÇON

A. — Incendies.

1. Beaucoup d'incendies sont dus au mauvais état des installations électriques.

Le feu peut être mis à des matières combustibles :

1° par un *conducteur électrique surchauffé* installé à proximité. L'intensité excessive dans la ligne est quelquefois due à l'emploi d'appareils récepteurs trop puissants, avec des coupe-circuit d'un calibre trop grand.

Vous savez aussi qu'un mauvais contact résultant d'une épissure mal exécutée, d'une borne insuffisamment serrée, produit un échauffement local parfois considérable.

2° par *l'arc électrique* qui s'amorce entre les deux parties d'un conducteur quand il se rompt lentement. L'amorçage d'un arc se produit aussi dans un coupe-circuit mal conçu quand le fil fusible fond.

3° par un *court-circuit* ou contact accidentel entre les parties métalliques de deux conducteurs entre lesquels existe une tension, ou entre deux fils à l'intérieur d'un appareil. Le courant devient très intense, chauffe les conducteurs au rouge, l'isolant s'enflamme ainsi que les matières combustibles voisines.

2. Dans le cas d'un incendie dû à un courant électrique, coupez d'abord le courant.

En projetant de l'eau, conductrice parce qu'elle n'est pas pure, sur les conducteurs « sous tension » on risque de s'électrocuter.

Il est préférable de combattre l'incendie avec du sable, ce qui n'est pas toujours possible, ou avec des extincteurs spéciaux à liquide non conducteur.

3. Pour diminuer les risques d'incendie, les installations électriques doivent être exécutées avec soin.

Dans les granges et les greniers où l'on entasse du foin et de la paille, dans les magasins où l'on entrepose des matières inflammables, il faut que les installations électriques soient pour le moins aussi soignées que dans les appartements.

On emploiera de l'appareillage de bonne qualité, des conducteurs de diamètre suffisant, sous tubes plutôt que sous moulures, et surtout des coupe-circuit bien calibrés dont les fusibles fondent sans danger. Éviter que des matières combustibles soient en contact avec les lignes de l'installation électrique.

Surtout on confiera l'exécution de l'installation à un électricien compétent.

Le premier venu peut poser des fils depuis le compteur ou une ligne existante jusqu'aux récepteurs, il suffit qu'ils aboutissent aux bornes convenables et les appareils fonctionnent. Cette facilité pousse à bien des « bricolages ». Or, une installation exécutée par une personne qui n'a pas d'expérience, qui ne se conforme pas aux règles du métier et aux prescriptions réglementaires, parce qu'elle les ignore, est une source de danger. A chacun son métier.

B. — Électrocution.

4. Rappelons que l'on emploie deux sortes de courants dans les installations électriques.

Le *courant continu*, caractérisé par son *sens invariable* dans les conducteurs qu'il parcourt, a été le premier dont on s'est servi. Il est encore utilisé dans des secteurs anciennement construits, que l'on ne transforme pas à cause de la dépense qui en résulterait pour la plupart des usagers, et dans certaines usines où ses propriétés particulières (électrolyse, souplesse des moteurs) sont indispensables.

Le *courant alternatif*, d'un emploi plus général, est caractérisé comme vous l'avez vu dans la première leçon d'électricité par son changement de

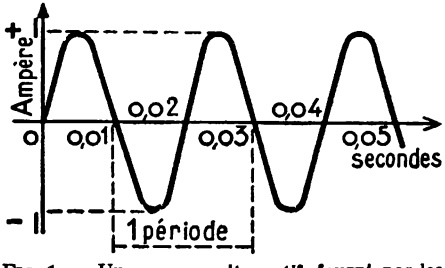


FIG. 1. — Un courant alternatif, fourni par les secteurs de distribution. change de sens 100 fois par seconde, et, au cours d'une période, passe par toutes les intensités comprises entre — I et + I.

sens qui s'effectue un grand nombre de fois par seconde et son intensité constamment variable (fig. 1). *Le nombre de fois qu'un courant alternatif reprend le même sens au cours d'une seconde se nomme la* **fréquence** *du courant.* Les secteurs français de distribution n'emploient guère que la fréquence 50 : c'est la *fréquence standard.* On dit que ce courant est à 50 *périodes par seconde.*

En médecine, en télégraphie et téléphonie sans fil (TSF), on se sert de courants de plusieurs milliers de périodes par seconde (5 000 à 10 millions) : ce sont des *courants à haute fréquence.*

Le courant continu et le courant alternatif agissent un peu différemment sur les êtres vivants.

5. Actions du courant électrique sur le corps humain.

a) Les accidents les moins graves sont les *brûlures.* Par exemple, un électricien imprudent se brûle quand un fusible fond dans ses mains, quand un arc électrique jaillit entre les deux morceaux d'un conducteur qui se rompt à l'endroit saisi.

Ces brûlures sont souvent longues à guérir et laissent des cicatrices. Il semble que la chair a été plus ou moins détruite autour de la partie brûlée par l'électrolyse du contenu des cellules qui la constituent.

b) L'électrocution grave et souvent mortelle résulte de l'action du courant électrique sur le système nerveux de la victime. Le courant produit soit la paralysie du cœur, soit la paralysie des centres respiratoires et l'asphyxie par arrêt du fonctionnement des poumons.

La sensibilité du système nerveux au courant électrique n'est pas la même pour tous les individus. Pour la même personne, elle varie avec l'état physiologique et psychique à l'instant de l'accident. C'est ainsi qu'un contact électrique est plus dangereux quand il est inattendu et surprend le patient que lorsqu'il est prévu et voulu. De même, il est plus dangereux à l'état de sommeil qu'à l'état de veille.

c) Si le courant, dans le corps humain, ne parcourt qu'un bras ou qu'une jambe, il est beaucoup moins dangereux que s'il traverse la région du cœur ou des poumons.

d) Le courant alternatif de fréquence moyenne (25 à 100 *périodes par seconde*) produit une crispation des muscles. Il n'est plus possible de lâcher un conducteur de courant alternatif sous tension quand on l'a saisi sans être isolé : les muscles de la main se contractent et serrent fortement le conducteur qu'il faudrait abandonner.

Les courants à haute fréquence (plus de 5 000 *périodes par seconde*) *ne sont pas dangereux.* Ils ne pénètrent pas dans le corps et se propagent seulement par la peau.

6. Valeurs dangereuses de l'intensité du courant.

Des expériences de plusieurs savants ont établi que la mort d'une personne peut être causée :

1° par un courant de 0,05 *ampère en courant continu*;

2° par un courant de 0,025 *ampère en courant alternatif* de fréquence moyenne.

7. Valeur de la résistance électrique du corps humain.

Le corps humain est une masse de tissus vivants très riches en eau avec des sels dissous, donc bons conducteurs; cette masse est enveloppée par la peau dont la résistance électrique est grande.

Les résultats de nombreuses mesures de résistance faites sur diverses personnes diffèrent beaucoup les uns des autres. Entre les deux mains d'ouvriers (fig. 2), mains calleuses et bien sèches, on a trouvé de 40 000 à 100 000 *ohms*. Pour des employés de bureau, cette résistance n'a été que 5 000 *ohms*.

La résistance peut s'abaisser jusqu'à 1 000 *ohms* si la peau des mains est pénétrée d'humidité par de la sueur, de la vapeur ou de l'eau tiède.

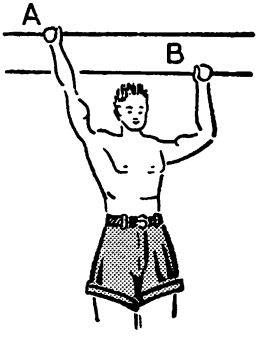


FIG. 2. — **La résistance du corps humain,** mesurée entre les deux mains, est différente suivant les individus : elle peut s'abaisser jusqu'à 1 000 ohms.

8. Tensions dangereuses.

On trouve, en appliquant la formule U = RI, qu'en courant continu l'intensité dangereuse de 0,05 *ampère* est obtenue dans une résistance de 1 000 *ohms* avec une tension de 1 000 × 0,05 = 50 *volts* [1].

FIG. 3. — Le **danger électrique est invisible** : il n'en est que plus redoutable.

En courant alternatif, l'intensité dangereuse de 0,025 *ampère* est produite par 1 000 × 0,025 = 25 *volts* (fig. 3).

Le décret du 4 août 1935 qui a imposé l'emploi, dans certains cas, de basses tensions, dites *tensions de sécurité*, fixe le maximum de ces tensions de sécurité à 24 *volts alternatifs* ou 50 *volts continus*. Ce sont les tensions

1. La résistance du corps humain diminue quand la tension croît ou quand la durée d'application de la tension augmente. Ce n'est pas une résistance comme les résistances métalliques. Se servir de la loi d'Ohm quand il s'agit du corps humain ne conduit donc qu'à des conclusions incertaines.

d'alimentation des lampes mobiles, dites *baladeuses*, employées dans les locaux très humides.

9. Conditions dans lequelles se produisent les accidents.

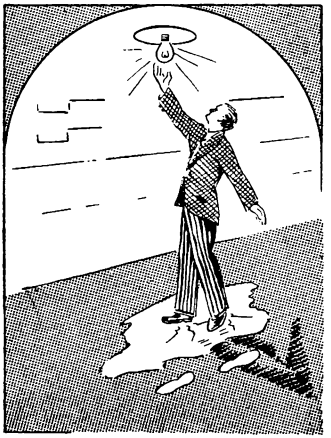


FIG. 4. — Dans un local humide, toucher de la main une douille de lampe mal isolée est dangereux.

Ou bien le corps de la victime a touché à la fois deux points du circuit entre lesquels existe toute la tension de l'installation : le contact a été *bipolaire.*

Ou bien le corps a touché d'une part un point du circuit, d'autre part est resté en contact avec le sol dans un endroit où le sol est conducteur : le contact est dit *unipolaire.* Ce cas est le plus fréquent; il se produit, par exemple, quand un conducteur aérien tombe sur une personne. D'ailleurs, l'un des fils des distributions de courant alternatif, le fil neutre, est mis à la terre à la sous-station : une personne placée sur un sol humide, donc bon conducteur, qui touche un fil de phase, risque l'électrocution (fig. 4).

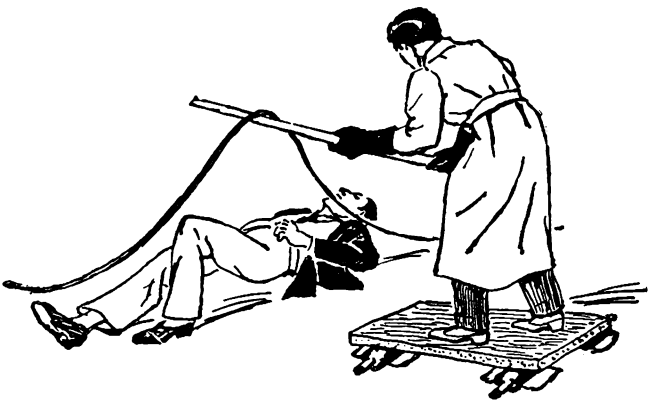


FIG. 5. — **Comment écarter un câble à haute tension d'un électrocuté.** Le sauveteur doit avoir soin de s'isoler du sol à l'aide d'une planche reposant sur des bouteilles. Mettre des gants. Écarter le câble à l'aide d'un bâton.

10. Secours et soins aux électrocutés.

a) Si la victime est restée en contact avec le conducteur sous tension,

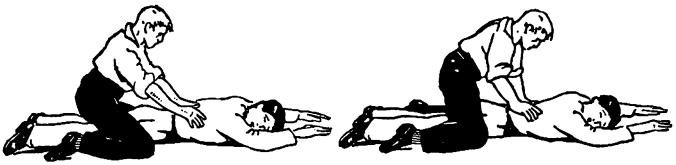


FIG. 6. — **Respiration artificielle par la méthode Schaeffer.** Le malade est étendu sur le sol, ventre contre terre, bras allongés en avant, figure tournée sur le côté. Le sauveteur se place à genoux, les cuisses du patient entre ses jambes. Il pose les mains ouvertes sur le dos, *au niveau des dernières côtes*, les pouces se touchant presque.
Il appuie alors progressivement de tout son corps pendant 3 ou 4 secondes de manière à provoquer l'expiration. Puis il cesse de presser et s'assied sur ses mollets, tout en maintenant les mains en place. L'inspiration se produit par l'élasticité des tissus du thorax et du ventre.
Le sauveteur doit renouveler ces mouvements *à la cadence de sa propre respiration.* Ce traitement peut durer longtemps; certaines syncopes respiratoires ont pris fin après *plusieurs heures* de respiration artificielle.
Dans les périodes où la fatigue oblige à interrompre ces mouvements, on peut pratiquer des **tractions rythmées de la langue.**

les sauveteurs risquent de s'électrocuter en touchant le corps du blessé sans être bien isolés.

Ils placeront sous leurs pieds des planches ou des madriers *secs*, ils accrocheront le conducteur avec un long morceau de bois sec en se protégeant les mains avec des gants, des vêtements de laine non humides, du tissu caoutchouté, du papier en plusieurs épaisseurs (fig. 5).

S'ils peuvent y arriver très rapidement, il est préférable qu'ils coupent ou fassent couper le courant au départ de la ligne.

b) On appellera un docteur pour soigner l'électrocuté, et, en attendant sa venue, on tentera la respiration artificielle puisque beaucoup d'électrocutions sont des asphyxies (fig. 6 et 7).

Les soins doivent être donnés sans délai. Il vaut mieux traiter le blessé sur place que de perdre des minutes précieuses à le transporter à l'hôpital. Le rétablissement de la respiration naturelle peut demander plusieurs heures. C'est seulement un médecin qui peut confirmer la mort de la victime.

FIG. 7. — **Tractions rythmées de la langue.** On serre la langue dans un mouchoir et l'on effectue des tractions, bien à fond, suivies de relâchement, rythmées sur sa propre respiration.

11. Prévention des accidents.

a) Les règles à suivre pour réaliser des installations électriques donnant des garanties de sécurité sont imposées aux installateurs par le décret du 4 août 1935 et les instructions qui l'accompagnent. Ce serait une faute grave de ne pas s'y conformer.

Des soins particuliers sont à apporter aux installations dans les locaux humides. Dans les cabinets de toilette, les salles de bains, les buanderies, les abat-jour en métal sont prohibés ainsi que les douilles de lampes avec interrupteurs. Les douilles sont en porcelaine ou en bakélite. Les prises de courants et les interrupteurs sont placés à bonne distance des lavabos, des bacs à eau et surtout des baignoires.

b) *Un ouvrier électricien doit éviter de travailler sur une ligne sous tension.* Prendre des précautions n'a rien d'humiliant. Il est presque toujours facile d'isoler du reste de l'installation la partie du circuit où l'on travaille, soit en enlevant les fusibles, soit en ouvrant l'interrupteur au tableau de distribution.

c) *Quant aux jeunes gens, qu'ils n'oublient pas qu'une installation électrique est dangereuse. On ne joue pas avec le courant électrique, on ne s'amuse pas à « électriser » des camarades : jeux et plaisanteries risquent de se terminer tragiquement.*

RÉSUMÉ

1. — Les installations électriques mal conçues, exécutées sans soins ou en mauvais état, risquent de causer des incendies.

2. — Le courant électrique peut provoquer des électrocutions, surtout le courant alternatif de moyenne fréquence.

Un courant continu de 0,05 *ampère* ou un courant alternatif de 0,025 *ampère* traversant le corps humain sont souvent mortels.

Sont considérées comme dangereuses les tensions continues supérieures à 50 *volts* et les tensions alternatives dépassant 24 *volts*.

3. — La mort par électrocution résulte, soit de la paralysie du cœur, soit plus souvent de l'arrêt du fonctionnement des poumons.

On soigne les électrocutés comme les asphyxiés, en pratiquant la respiration artificielle.

EXERCICES

1. Un interrupteur unipolaire suffit pour couper le courant dans un récepteur à courant continu ou monophasé. Pour quelle raison les règlements prescrivent-ils de commander les récepteurs de plus de 500 *watts* par des interrupteurs bipolaires?

2. Des oiseaux se perchent sur les lignes de transport d'énergie électrique à tension élevée. Expliquer pourquoi ils ne sont pas électrocutés.

3. Pourquoi les basses tensions obtenues à partir de tensions élevées par l'intermédiaire de résistances en série (rhéostats) ou en dérivation (potentiomètre) ne sont-elles pas des tensions de sécurité?

4. AIMANTS, ÉLECTROAIMANTS, SONNERIES ÉLECTRIQUES

19e LEÇON

Aimants. — Électro-aimants.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un barreau aimanté droit (longueur 300 mm, *largeur* 25 mm, *épaisseur* 10 mm).
Un barreau de fer doux (longueur 250 mm, *largeur* 25 mm, *épaisseur* 10 mm).
Une aiguille aimantée sur pivot.
Une bobine magnétisante (longueur 200 mm, *épaisseur des joues* 5 mm, *passage du noyau* 30 × 30 mm, 628 *spires en* 4 *couches de fil* 12/10 *émaillé ou isolé coton, résistance environ* 1,5 Ω).
Un tire-bouchon (quatre fois la taille ordinaire).
Une lime de 250 mm.
Une tige de laiton, 1 *bâton de zinc.*
Un électro-cuirassé.
Une rondelle de carton, diamètre 100 mm, *épaisseur* 2 mm.
Une rondelle de bois, diamètre 100 mm, *épaisseur* 10 mm.
Limaille de fer, 100 g *de pointes ou clous.*
Une batterie d'accumulateurs de 3 *éléments.*

LEÇON

A. — Aimants permanents.

1. Les aimants usuels ont deux pôles.

Voici un barreau d'acier aimanté. Plongeons-le dans de la limaille de fer. La limaille s'attache en houppes à ses extrémités (fig. 1).

Les régions où la limaille est attirée se nomment les **pôles** *de l'aimant.*

Nous pourrions mesurer, avec une balance, la force avec laquelle chaque pôle maintient un même morceau de fer appliqué contre lui. *Cette force est la même pour les deux pôles.*

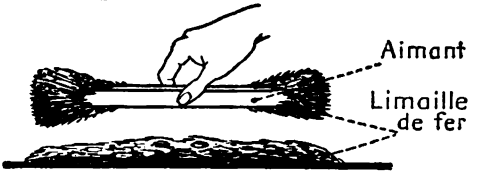


FIG. 1. — La limaille de fer s'attache en houppes à chaque extrémité de l'**aimant.**

En appliquant un morceau de fer ou d'acier doux contre un pôle d'aimant, nous constatons que cette pièce attire la limaille par son extrémité libre (fig. 2).

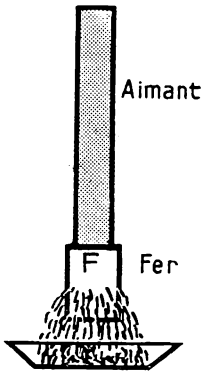


FIG. 2. — Le pôle est transporté à l'extrémité du morceau de fer F qui prolonge l'aimant.

Elle s'est aimantée, et tout se passe comme si le pôle de l'aimant se trouvait transporté à son extrémité. Cette **aimantation par influence** disparaît si l'on sépare la pièce de l'aimant.

Cette propriété explique la possibilité de rapporter sur les pôles d'un aimant des *pièces polaires* en acier doux facilement usinables auxquelles on donne les formes convenant à l'emploi de l'aimant (fig. 3).

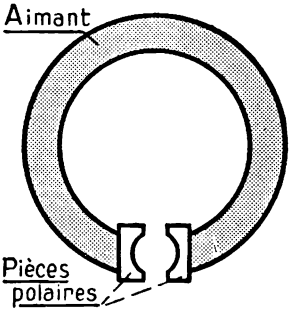


FIG. 3. — Cet aimant d'ampèremètre ou de voltmètre est muni de **pièces polaires rapportées.**

2. Un aimant mobile s'oriente.

Rendons mobile un barreau aimanté, soit en le plaçant sur un bou-

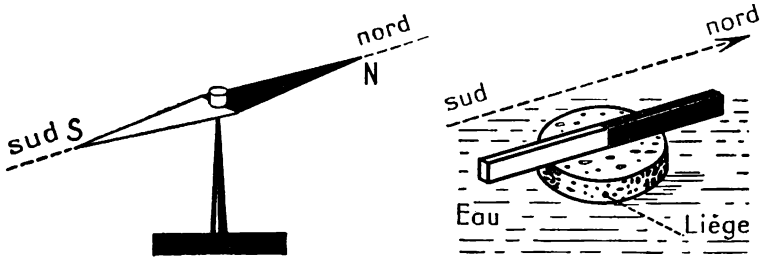


FIG. 4. — Un aimant mobile s'**oriente** à peu près dans la direction nord-sud géographique.

chon plat flottant sur de l'eau, soit en le suspendant par un fil à coudre attaché en son milieu, soit en le mettant en équilibre sur un pivot. L'aimant s'oriente toujours dans la même direction, à peu près le nord-sud géographique (fig. 4).

Le pôle, toujours le même, qui se tourne vers le nord est nommé **pôle nord,** l'autre est le **pôle sud.**

Vous savez que l'on utilise cette propriété pour faire des *boussoles* qui servent aux excursionnistes, aux militaires et aux marins pour s'orienter.

3. Les pôles de même nom se repoussent, les pôles de noms différents s'attirent.

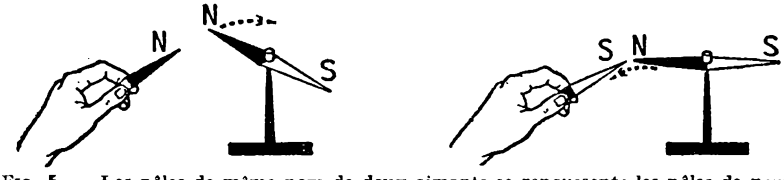


FIG. 5. — Les pôles de même nom de deux aimants se repoussent; les pôles de noms différents s'attirent.

Approchons un barreau aimanté d'une aiguille aimantée montée sur un pivot vertical ou d'une boussole : nous constatons cette répulsion et cette attraction (fig. 5).

4. Des aimants sont employés pour fabriquer des instruments de mesure.

Nous en avons vu des exemples dans des leçons précédentes : les ampèremètres et les voltmètres à cadre mobile et aimant, les galvanomètres, les ohmmètres comportent des aimants.

La qualité essentielle que l'on cherche dans ces aimants est l'invariabilité de leur aimantation. On les fabrique soit en acier à 6 % de tungstène ou de chrome, trempé, soit en acier à 30 % de cobalt, on les aimante et on les laisse reposer plusieurs mois pour que leur aimantation se stabilise, avant de les employer.

Depuis quelques années, on fabrique aussi des aimants avec des alliages plus complexes, tels qu'un acier au nickel et au titane, ou un acier contenant du cobalt, du nickel, de l'aluminium et du titane. Ces alliages se coulent, mais ne se forgent pas; on ne peut les travailler qu'à la meule. Dans les appareils de mesure, on en constitue le corps des aimants sur lequel on rapporte des pièces polaires en acier doux facilement usinable.

B. — Électro-aimants.

5. Une tige de fer s'aimante quand on la place dans une bobine parcourue par un courant.

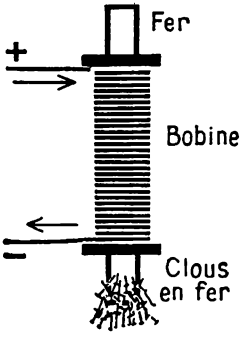


FIG. 6. — Une tige de fer s'aimante quand elle est placée dans une bobine parcourue par un courant.

1° Plaçons dans une bobine un barreau de fer qui sort de quelques centimètres aux deux extrémités. Faisons passer un courant continu dans la bobine. Le barreau de fer devient capable d'attirer *fortement* des clous assez lourds, il s'est **aimanté** (fig. 6).

La bobine est nommée **bobine magnétisante,** le barreau de fer est le **noyau** de la bobine.

2° Avec une aiguille aimantée ou une boussole, repérons les pôles du barreau. Soit, par exemple, le pôle nord en bas, le pôle sud en haut.

Changeons le sens du courant. Le barreau s'aimante encore, mais la polarité de ses extrémités est changée : *cette polarité dépend* donc *du sens dans lequel passe le courant autour du barreau.*

La règle dite du tire-bouchon de Maxwell fournit un moyen de connaître la nature des pôles sans recourir à une boussole ou à une

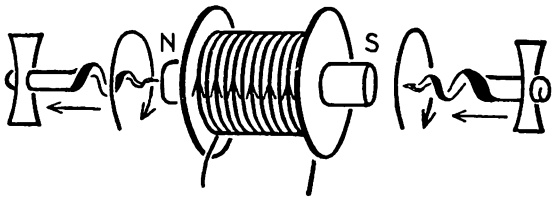


FIG. 7. — **Règle de Maxwell** : en faisant tourner le tire-bouchon dans le sens du courant il se déplace dans le sens pôle sud-pôle nord du noyau aimanté.

aiguille aimantée : **un tire-bouchon placé dans l'axe de la bobine magnétisante et tournant dans le sens du courant se déplace en allant du pôle sud au pôle nord à l'intérieur du barreau** (fig. 7).

3° Coupons le courant. Les clous, qu'attirait le noyau, tombent. **L'aimantation du fer n'est que temporaire.** Pourtant nous constatons,

avec une aiguille aimantée, qu'elle ne disparaît pas complètement dès la suppression du courant. Le peu qui en reste, et que l'on nomme **aimantation rémanente,** continue à diminuer lentement.

A l'ensemble de la bobine et du noyau de fer, on donne le nom d'**électro-aimant.**

4° Prenons comme noyau, soit une tige d'acier trempé, une lime par exemple, soit un barreau de fonte. Faisons passer un courant dans la bobine : le noyau s'aimante (fig. 8). Coupons le courant : *le noyau reste aimanté*, en d'autres termes, son aimantation rémanente est plus grande et plus durable que dans le cas d'un noyau de fer doux. *La tige d'acier trempé est devenue un* **aimant permanent.**

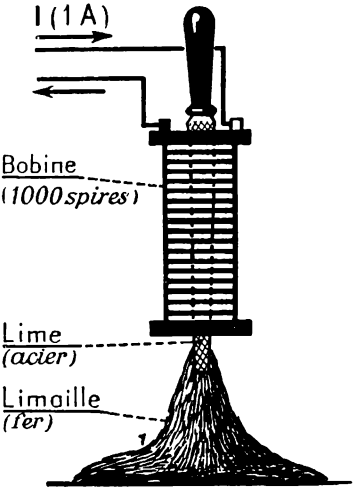


FIG. 8. — Un barreau d'acier trempé s'aimante à l'intérieur d'une bobine et reste aimanté.

C'est avec une bobine magnétisante que l'on aimante les aimants permanents.

5° Essayons comme noyau de la bobine magnétisante des tiges de cuivre, de zinc, d'aluminium, de plomb: ces métaux ne s'aimantent pas : on dit qu'*ils ne sont pas magnétiques.*

Seuls parmi les métaux, le fer et la plupart de ses alliages, un peu le nickel et le cobalt sont magnétiques.

Pourtant l'acier à 13 % de manganèse, l'acier à 8 % de nickel et 18 % de chrome avec lequel on fabrique la vaisselle inoxydable et d'autres aciers au nickel ne s'aimantent pas.

6. On donne diverses formes aux électro-aimants.

1° ***Électro-aimants à noyau fixe.*** — La figure 9 représente trois de leurs formes. Le premier électro-aimant est à noyau droit. La forme en fer à cheval des noyaux des deux autres rapproche les deux pôles, dont les attractions sur l'armature en fer qui les réunit s'ajoutent. Avec un électro-aimant très ramassé, on peut obtenir une **force portante** considérable.

Recommençons une expérience que nous avons faite au cours de la première leçon d'électricité. Voici un petit électro-aimant *cuirassé,*

c'est-à-dire construit de manière que l'un des pôles entoure la bobine magnétisante et l'autre noyau. L'armature, soigneusement dressée, s'applique sans jeu sur toute la surface des deux pôles.

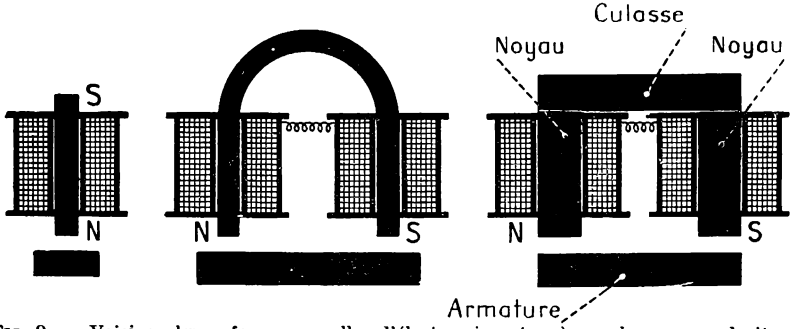


FIG. 9. — Voici quelques formes usuelles d'électro-aimants : à gauche, noyau droit; — au milieu, noyau en fer à cheval d'une seule pièce; — à droite, la carcasse est formée de trois pièces : une culasse et deux noyaux. Chaque électro-aimant est muni d'une armature en fer doux.

Quand un courant passe dans la bobine, vous constatez que l'armature appliquée sur les pôles y est maintenue avec une force considé-

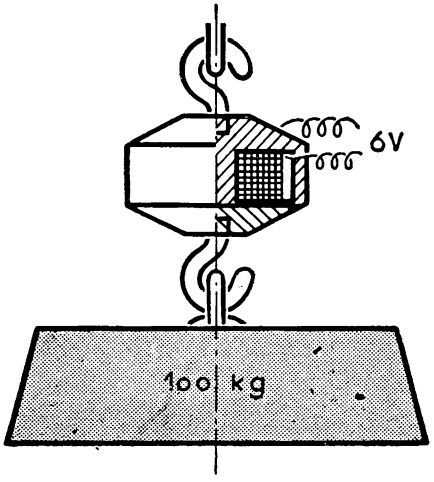


FIG. 10. — Un petit électro-aimant cuirassé, alimenté par trois éléments d'accumulateur, a une force portante de l'ordre de 100 *kg.p.*

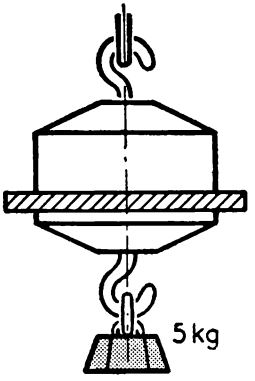


FIG. 11. — Quand la distance entre les pôles et l'armature croît, l'attraction diminue beaucoup.

rable, de l'ordre de 100 *kilogrammes-poids*, soit environ 10 *kilogrammes-poids* par centimètre carré de surface de contact entre l'armature et les pôles (fig. 10).

Plaçons entre l'armature et les pôles une feuille de carton épaisse d'à peu près 2 *millimètres*, nous pouvons alors arracher assez facilement l'armature des pôles.

Remplaçons la feuille de carton par une plaquette de bois de 10 *millimètres : l'attraction entre armature et pôles est très réduite* (fig. 11).

La force portante d'un électro-aimant diminue donc **très vite quand la distance entre armature et pôles croît.** Si l'on désire que la force attractive soit grande, la course de l'armature ne peut être que très faible.

2° ***Électro-aimants à noyau plongeur.***

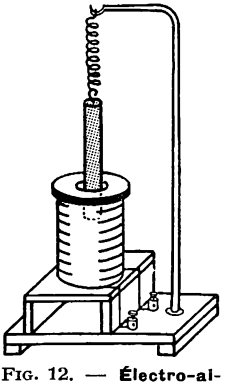


FIG. 12. — **Électro-aimant à noyau plongeur.** La course du noyau est de plusieurs centimètres, mais la force d'attraction est faible.

Plaçons un noyau de fer doux dans l'axe et à l'extérieur d'une bobine creuse parcourue par un courant (fig. 12). La tige est avalée jusqu'à ce que son milieu arrive au milieu de la bobine.

La course du noyau atteint quelques centimètres, mais la force d'attraction n'est que de quelques centaines de grammes-poids.

On augmente beaucoup la force attractive en munissant la bobine d'une cuirasse en acier ou en fonte. On fabrique ainsi des électro-aimants cuirassés à noyau plongeur, pour manœuvrer les signaux de chemins de fer, dont le noyau, attiré avec une force de 50 à 100 *kilogrammes-poids*, parcourt 10 à 15 *centimètres* (fig. 13).

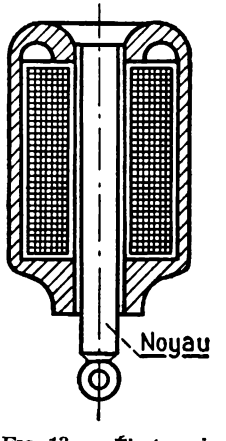


FIG. 13. — **Électro-aimant cuirassé à noyau plongeur.** La force d'attraction du noyau est augmentée.

RÉSUMÉ

1. — Un aimant est une tige d'acier dont les extrémités ou pôles attirent la limaille de fer. Les pôles de même nom de deux aimants se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.

2. — Un électro-aimant est constitué par un noyau en fer ou en acier placé à l'intérieur d'une bobine que parcourt un courant électrique. Le noyau s'aimante quand passe le courant. S'il est en fer, il se désaimante quand le courant cesse ; s'il est en acier, il reste aimanté après suppression du courant.

3. — Les électro-aimants ont des formes variées. Pour augmenter leur force portante, on rapproche les deux pôles qui attirent alors la même armature. Quand la distance entre les pôles et l'armature dépasse plusieurs millimètres, l'attraction est faible.

EXERCICES

1. On approche du pôle nord d'une aiguille aimantée l'extrémité d'une tige d'acier : le pôle nord de l'aiguille est attiré. Peut-on conclure de cette expérience que la tige d'acier est aimantée ?

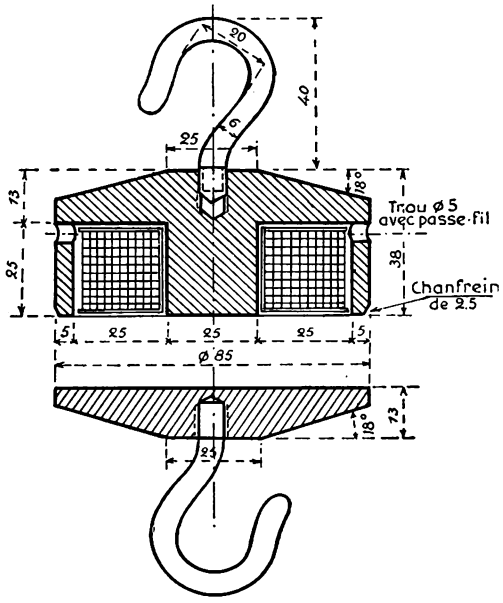


FIG. 14.
Dessin d'exécution d'un **électro-aimant cuirassé.**

2. La force portante d'un électro-aimant peut être grande. En résulte-t-il que le courant qui alimente l'électro-aimant fournit un travail considérable?

3. Dessinez un électro-aimant en fer à cheval avec deux bobines, une sur chaque branche du noyau. Indiquez par une flèche sur chacune de ces bobines quel doit être le sens du courant pour qu'il y ait un pôle nord à l'extrémité gauche du noyau et un pôle sud à l'extrémité de droite.

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

a) ***Aimants permanents.*** — Les aimants permanents des appareils de mesure sont en acier au carbone à 6 % de tungstène ou en acier à 30 % de cobalt.

Pour fabriquer les barreaux droits servant aux expériences de la 19e leçon, l'acier dur au carbone suffit. Des barreaux longs de 250 à 300 *mm* sont découpés dans une barre de 25×12 *mm*^{2}, marqués d'un N et d'un S aux extrémités, puis trempés à l'huile. Ils sont aimantés

dans une bobine d'un millier d'ampères-tours. L'induction rémanente s'affaiblit assez vite et l'aimantation doit être recommencée chaque année.

Les barreaux sont conservés par paires, dans des boîtes plates en bois. Ils sont séparés par une tringle de bois large de 30 *mm*, les pôles de noms contraires en regard réunis par des barrettes d'acier doux.

Quant aux aimants en U pliés sur champ, on se les procurera chez un fabricant d'appareils de physique ou de mesures électriques.

La fabrication des aiguilles aimantées montées sur pivot n'est pas difficile, mais assez longue. Il est préférable d'acheter ces petits appareils.

b) ***Électro-aimant cuirassé.*** — La figure 14 porte toutes les dimensions de construction. La bobine, dont la carcasse est en presspahn épais, comprend environ 670 spires de fil de cuivre émaillé de 7/10 *mm*. Les entrées et sorties sont faites en fil souple.

L'appareil se monte directement, sans rhéostat, sur une batterie d'accumulateurs de trois éléments.

c) ***Électro-aimant à noyau plongeur.*** — On utilise une **bobine** de 360 spires de transformateur démontable (40e leçon). Elle s'encastre dans un support de bois (fig. 15).

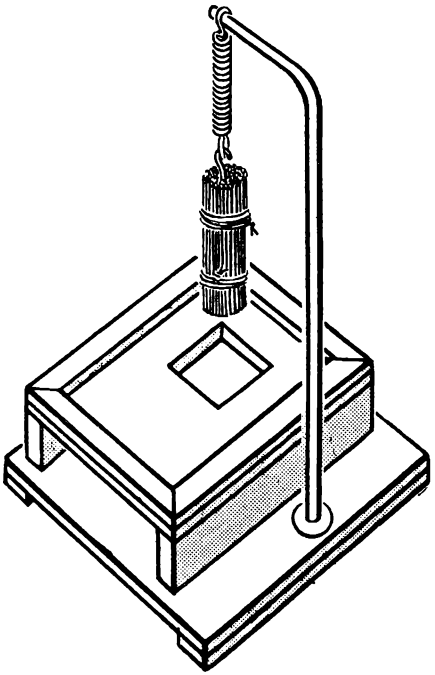


FIG. 15. — Support de bobine pour un électro-aimant à noyau plongeur.

Pour que l'appareil puisse être employé avec du C. A. et du C. C., le **noyau** est fait de fils de fer de 1 à 2 *mm* de diamètre, serrés par des ligatures en ficelle, en un cylindre de 20 *mm* de diamètre, long de 120 *mm*.

Ce noyau est suspendu par un ressort (*longueur:* 70 *mm*, *diamètre* 10 *mm*) de fil d'acier de 1 *mm* à une potence faite d'une tige de fer de 6 *mm*, de manière à pénétrer, au repos, de 10 à 20 *mm* dans la bobine.

L'électro peut être monté sans rhéostat sur une batterie d'accumulateurs de trois éléments.

Applications des électro-aimants. Sonneries électriques.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une sonnerie trembleuse ordinaire.
Deux ou 3 boutons d'appel.
Un tableau indicateur à quatre voyants.
Un manipulateur Morse.
Trois éléments Leclanché ou une batterie de 3 accumulateurs.
Quatre à cinq mètres de fil pour sonnerie.
Si possible, un exemplaire, même détérioré, des appareils décrits dans la leçon.

LEÇON

Beaucoup d'appareils électriques usuels comportent des électro-aimants pour mouvoir certains de leurs organes. En général, dès qu'on en a tracé le schéma, leur fonctionnement est facile à comprendre. Nous n'en citerons qu'un petit nombre, en insistant un peu sur les sonneries électriques, que les monteurs-électriciens ont souvent à installer.

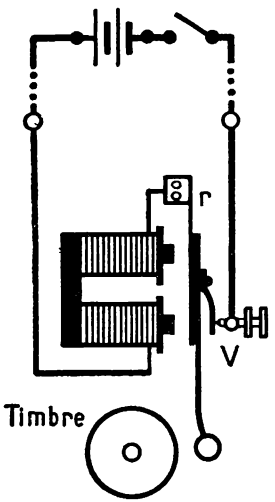


FIG. 1. — Schéma d'une **sonnerie trembleuse.**

A. — Sonneries électriques.

1. Sonnerie trembleuse.

La **sonnerie** (fig. 1) consiste en un électro-aimant dont l'armature, fixée à un ressort *r*, fait partie du circuit électrique et s'appuie, au repos, contre une vis réglable V, où aboutit l'un des fils d'amenée du courant.

Quand un courant passe dans l'électro-aimant, l'armature est attirée, le marteau qui la termine vient frapper sur un timbre. En même temps, le courant est coupé en V;

le ressort *r* ramène l'armature à sa position de repos, le courant se rétablit et le mouvement de l'armature continue tant qu'on appuie sur le bouton d'appel.

Le **bouton d'appel** (fig. 2) est un interrupteur formé de deux ressorts plats, que l'on applique l'un contre l'autre pour faire passer le courant.

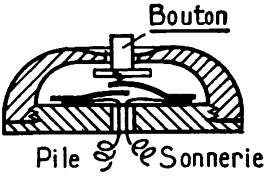


FIG. 2. — **Bouton d'appel** pour actionner une sonnerie.

Indiquons, pour préciser les idées, que les sonneries ordinaires portent de 400 à 500 spires sur chaque noyau de l'électro-aimant; elles ont une résistance de 6 à 8 *ohms* et fonctionnent bien avec un courant de 0,4 à 0,5 *ampère*.

On règle une sonnerie, quand elle est installée, en vissant ou dévissant la vis V pour trouver la position qui donne le son le plus intense.

2. Voici quelques schémas d'installations de sonneries.

a) ***Une sonnerie, un bouton d'appel.*** C'est l'installation la plus simple et la plus fréquente que l'on réalise par exemple à la porte d'un appartement (fig. 3). Le bouton est fixé à l'extérieur, sur le cadre de la porte; la pile est à l'intérieur, souvent au-dessus de la porte; la sonnerie, en un point de l'appartement où on l'entend bien. Les trois appareils sont montés en série.

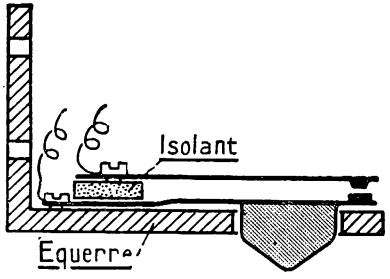


FIG. 4. — **Contact de passage** à fixer au-dessus d'une porte pour actionner une sonnerie quand la porte s'ouvre ou se ferme.

Une variante de cette disposition est le **contact de passage** qui, dans les petits magasins, fait fonctionner une sonnerie quand la porte d'entrée s'ouvre ou se ferme. Ce contact, qui remplace le bouton d'appel, consiste en deux ressorts portés par une équerre de laiton, fixée au chambranle au-dessus de la porte d'entrée (fig. 4). La traverse supérieure de la porte, en passant sous l'équerre, met les deux ressorts en contact et ferme, pendant quelques instants, le circuit de la sonnerie.

b) ***Deux sonneries avec deux boutons pour appel et réponse.*** La figure 5 montre qu'il suffit d'une seule pile et de trois fils de ligne.

c) ***Plusieurs sonneries avec un seul bouton.*** Les sonneries sont montées en dérivation sur une ligne à deux fils (fig. 6).

Les installer en série ne donnerait pas de bons résultats, parce que la durée d'oscillation des différents marteaux n'est pas rigoureusement la même.

d) ***Une sonnerie commandée par plusieurs boutons.*** La figure 7

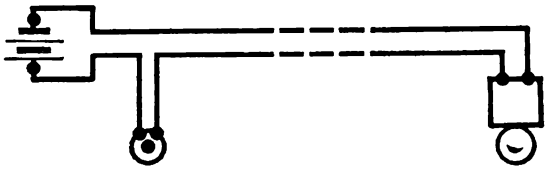


FIG. 3. — **Une sonnerie avec un bouton d'appel.** La pile, la sonnerie, le bouton d'appel sont montés en série.

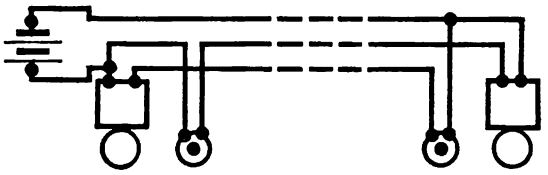


FIG. 5. — Deux sonneries avec deux boutons pour **appel** et **réponse.**

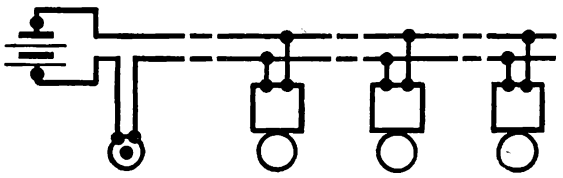


FIG. 6. — **Plusieurs sonneries** actionnées à la fois par **un seul bouton.** Les sonneries sont montées en parallèle.

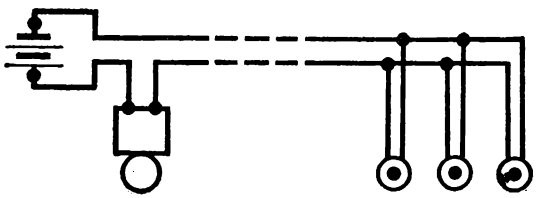


FIG. 7. — **Une seule sonnerie, plusieurs boutons d'appel.**

donne le schéma de cette installation que l'on réalise par exemple quand, de plusieurs bureaux, on veut pouvoir appeler l'huissier de garde dans la salle d'attente.

Des conventions dans la façon de sonner permettent de distinguer les appelants, mais l'emploi d'un tel code n'est plus pratique si le nombre des boutons dépasse trois ou quatre. On ajoute alors à l'installation un **tableau indicateur d'appel.**

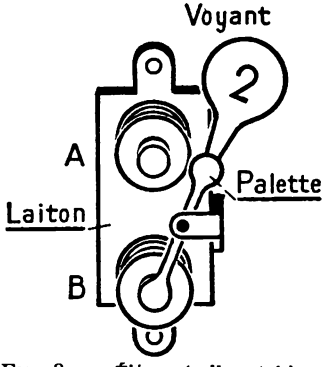


FIG. 8. — **Élément d'un tableau indicateur.** Les deux électros sont indépendants et montés sur une plaque non magnétique, (laiton ou zinc).

3. Tableau indicateur pour une installation de sonnerie avec plusieurs boutons.

A chaque bouton d'appel, 1, 2, 3, correspond dans le tableau indicateur un élément qui se compose de deux électro-aimants indépendants à noyaux droits (fig. 8).

L'électro-aimant supérieur A est en série avec le bouton d'appel correspondant, la sonnerie et la pile (fig. 9). Quand un courant le parcourt, il attire une palette en fer mobile autour d'un axe horizontal. La palette porte un voyant numéroté qui apparaît alors derrière une fenêtre du tableau et désigne ainsi le poste qui appelle.

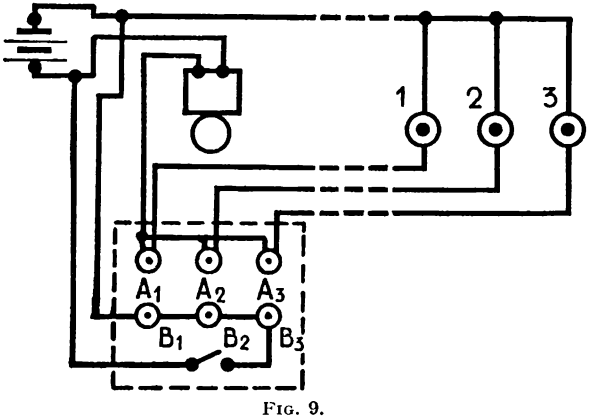


FIG. 9.
Schéma d'un **tableau indicateur d'appel** pour trois boutons.

L'électro-aimant inférieur B est inséré dans un circuit local commandé par un bouton placé sur le tableau. Quand on appuie sur ce bouton, un courant passe dans l'électro-aimant ; l'électro attire la palette mobile, le voyant, renvoyé vers la droite, disparaît derrière la partie opaque du tableau et l'indicateur est à nouveau en position d'attente. Tous les électro-aimants inférieurs sont en série.

4. Quelques indications sur l'exécution d'une installation de sonnerie.

Le *fil employé à l'intérieur des bâtiments* est souvent du fil de cuivre de 9/10. Son isolement est léger parce que la tension du générateur de courant employé n'est que de quelques volts; il se compose d'une couche de gutta-percha ou d'une bande d'un isolant synthétique sur laquelle sont enroulées en sens contraire deux couches de coton. On emploie aussi du fil de 5/10 enrobé dans un isolant synthétique sans textile.

Le fil est tendu et maintenu le long des murs par de petits isolateurs en os ou des cavaliers avec isolement de fibre.

Les *lignes extérieures* sont constituées par des fils isolés au papier sous plomb.

Le nombre d'éléments de la pile nécessaires pour le bon fonctionnement d'une sonnerie ne se calcule pas. On le détermine par un essai quand l'installation est achevée.

Les abonnés à un secteur fournissant du courant alternatif ont intérêt à alimenter leur installation de sonnerie avec un petit transformateur d'une dizaine de watts abaissant la tension à 5 ou 8 *volts*, plutôt que par une batterie d'éléments Leclanché. Ce transformateur est branché en permanence sur le secteur. Le bouton d'appel est monté sur la basse tension. La consommation quand la sonnerie ne fonctionne pas est si faible qu'elle n'est pas enregistrée par le compteur. Une telle installation fonctionne très longtemps sans entretien.

B. — Quelques autres électro-aimants.

5. Gâche électrique.

La plus simple, mais non la plus sensible, consiste en un électro-aimant dont le noyau plongeur chasse le pène à ressort de la serrure hors de la gâche, quand un courant est envoyé dans l'appareil (fig. 10). Si la porte n'est pas fermée à clef, on peut alors l'ouvrir d'une poussée.

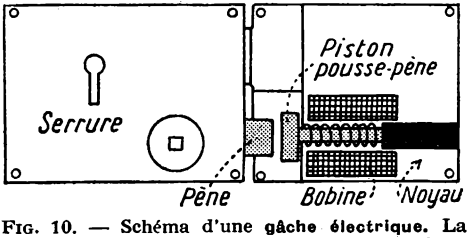


FIG. 10. — Schéma d'une gâche électrique. La bobine aspire le noyau qui pousse le pène de la serrure.

Le schéma de la figure 11 est celui de l'installation des sonneries et de la gâche

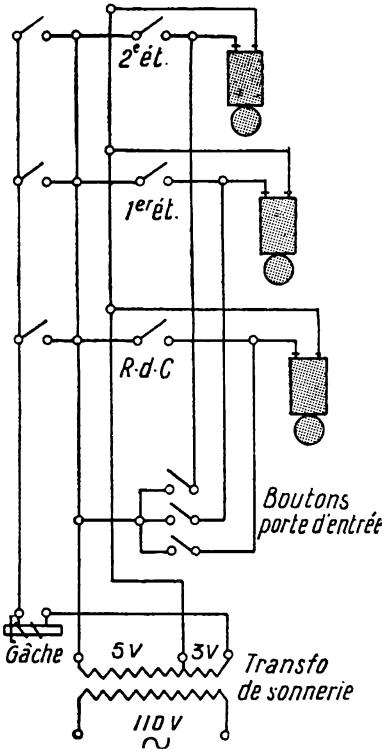


FIG. 11. — Installation combinée de **sonneries** et d'une **gâche électrique** dans une maison à trois appartements.

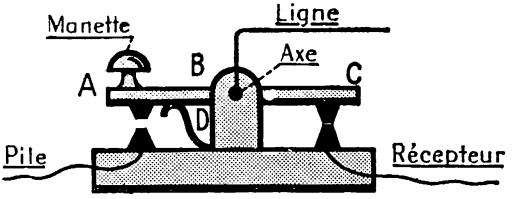


FIG. 12. — **Manipulateur Morse.** Quand on appuie sur la manette, on envoie un courant dans la ligne.

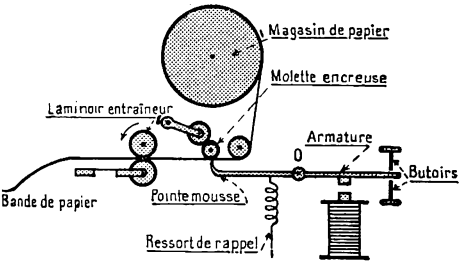


FIG. 13. — Schéma du **récepteur d'un télégraphe Morse.** Décrire le fonctionnement de l'appareil.

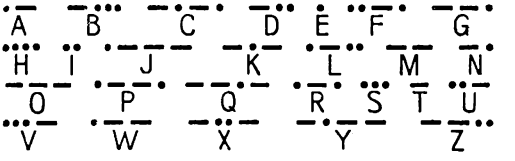


FIG. 14 — **Alphabet Morse.** Les lettres sont remplacées par des combinaisons de traits et de points.

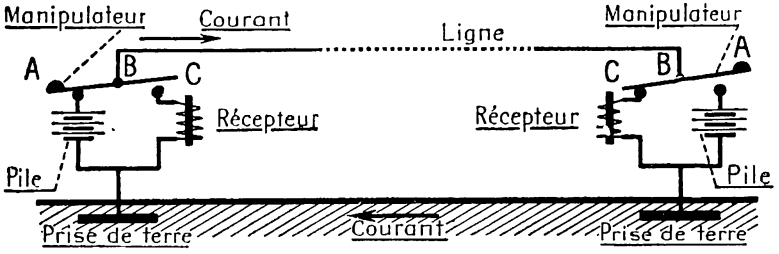


FIG. 15. — Schéma de la disposition de **deux postes télégraphiques** correspondants. On n'emploie qu'un fil de ligne pour télégraphier dans les deux sens.

électrique de la porte d'entrée d'une maison à trois appartements sans concierge. Un bouton de sonnerie pour chaque locataire est placé à la porte de l'immeuble, un autre à la porte de chaque appartement. Chaque locataire commande de chez lui la gâche électrique de la porte d'entrée.

L'installation tout entière est alimentée par un petit transformateur qui abaisse à 5 et 8 *volts* la tension alternative de 110 *volts* fournie par le secteur.

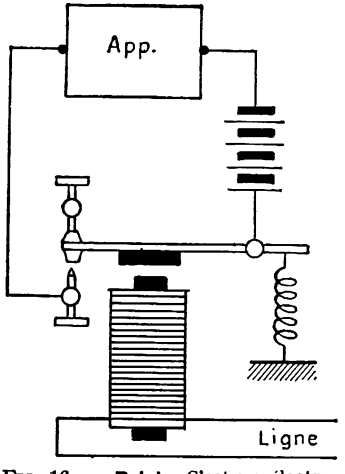


FIG. 16. — **Relais.** C'est un électro-aimant très sensible, dont l'armature ferme un circuit local.

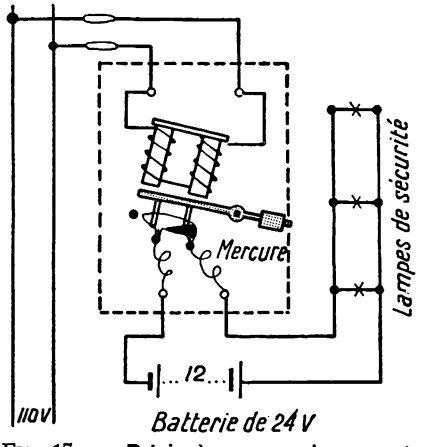


FIG. 17. — **Relais à manque de courant,** Quand le courant à 110 *V* vient à manquer, l'électro abandonne son armature; l'interrupteur à mercure bascule et les lampes de secours s'allument.

6. Télégraphe Morse.

Les deux stations qui échangent des télégrammes sont équipées de la même façon : à chacune d'elles se trouvent 1° une *pile*, 2° un *manipulateur*, 3° un *récepteur*.

Le **manipulateur** (fig. 12) est un levier en laiton mobile autour d'un axe B. Quand il est au repos, il met en communication la ligne et le récepteur. En appuyant sur la manette, on envoie un courant dans le récepteur du poste avec lequel on correspond.

Le **récepteur** (fig. 13) consiste essentiellement en un électro-aimant dont l'armature est un levier portant une molette toujours encrée. Quand un courant passe dans l'électro-aimant, la molette vient s'appliquer sur une bande de papier mobile et y inscrit un *point* ou un *trait* suivant

que la durée du courant est plus ou moins brève. Les lettres de l'alphabet sont représentées par des combinaisons de points et de traits (fig. 14).

Vous remarquerez qu'un seul fil de ligne suffit entre les deux postes correspondants, la terre sert de second fil pour compléter le circuit (fig. 15). A chaque poste, un pôle de la pile et un pôle du récepteur sont reliés à une grande plaque de cuivre ou de zinc enterrée profondément dans un sol humide. La résistance de ces *prises de terre* est assez grande, souvent de l'ordre d'une trentaine d'ohms.

7. Relais.

Un **relais** est un électro-aimant portant un grand nombre de spires, donc très sensible, commandé de loin par un courant peu intense (fig. 16). L'armature ferme un circuit local où peuvent se trouver des appareils puissants.

Certains relais fonctionnent quand le courant qui les alimente est coupé (fig. 17).

8. Contacteurs.

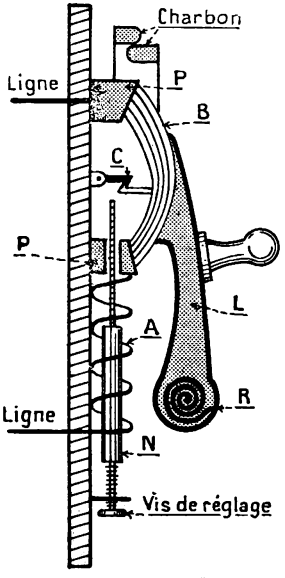


FIG. 18. — Schéma d'un **disjoncteur à maximum d'intensité.**

Les **contacteurs** servent à démarrer ou arrêter à distance les moteurs électriques. Un contacteur consiste essentiellement en un électroaimant qui, sous l'action d'un faible courant, ferme un interrupteur; quand le courant est coupé dans l'électro, l'interrupteur s'ouvre.

Nous décrirons un *contacteur - disjoncteur* après avoir étudié les moteurs à courant alternatif.

9. Disjoncteurs

Un **disjoncteur à maximum d'intensité** est un interrupteur à balais B appliqué sur des plots P par un levier qu'un ressort R rappelle à sa position d'ouverture (fig. 18). Un crochet C maintient l'interrupteur fermé.

Une bobine à gros fil A

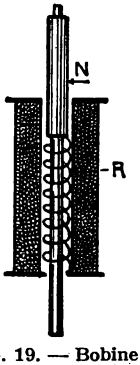


FIG. 19. — Bobine et noyau d'un **disjoncteur à minimum de tension.** Le reste de l'appareil est identique à celui de la figure 18.

est traversée par le courant de l'installation. Quand ce courant dépasse une valeur qui dépend de la position de la vis de réglage au bas de l'appareil, la bobine aspire un noyau N qui vient frapper le crochet, le soulève et le disjoncteur se déclenche.

Dans un **disjoncteur à minimum de tension** (fig. 19), une bobine en fil fin est branchée entre les deux fils de ligne. Quand elle est sous tension, le noyau, qui est à sa partie supérieure, est aspiré et comprime un ressort à boudin. Si la tension aux bornes de la bobine diminue beaucoup ou s'annule, le ressort repousse le noyau qui soulève le crochet C et le disjoncteur s'ouvre.

L'étincelle de rupture du courant jaillit entre deux contacts de zinc ou de charbon à la partie supérieure du disjoncteur.

10. Électro-aimants de levage.

De gros électro-aimants cuirassés servent à manutentionner des

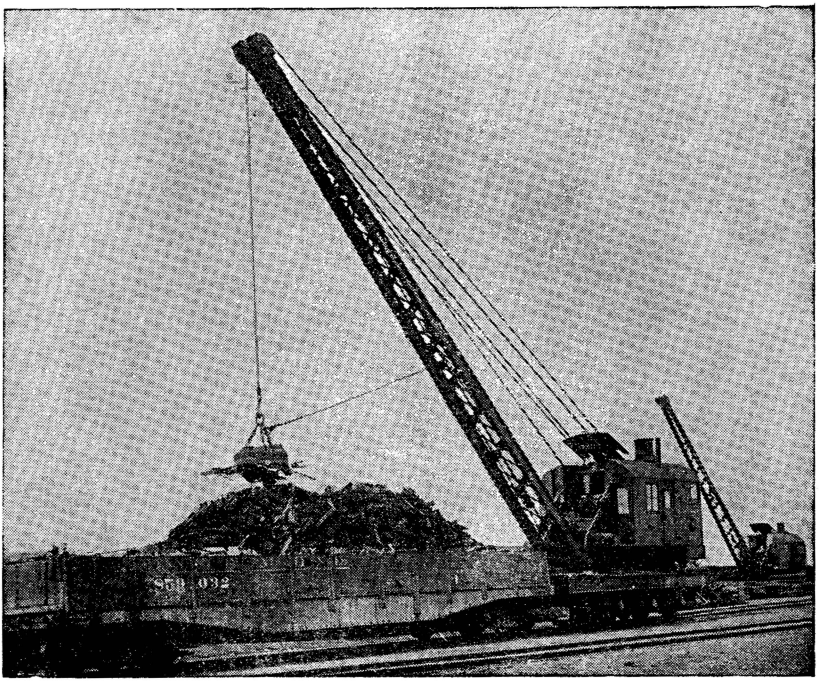


FIG. 20. — **Électro-aimant de levage** servant à décharger un wagon de ferrailles.

matériaux magnétiques tels que tôles, rails, paquets de ferrailles dans les usines métallurgiques (fig. 20). Leur force portante dépasse parfois une tonne.

RÉSUMÉ

1. — Les sonneries électriques sont l'application la plus commune des électro-aimants.

Quand une sonnerie est commandée par plusieurs boutons d'appel, on y ajoute un *tableau indicateur* pour identifier le bouton appelant.

2. — Avec l'installation de sonneries dans les maisons sans concierge à plusieurs appartements, on combine le montage d'une gâche électrique pour ouvrir la porte d'entrée de l'immeuble, avec un bouton placé dans chaque appartement.

3. — Le télégraphe Morse a un électro-aimant pour organe essentiel. Il en est de même des relais, des contacteurs, des disjoncteurs.

Les électro-aimants de levage sont des électros cuirassés dont la force portante est considérable.

EXERCICES

1. Indiquer des applications des électro-aimants autres que celles citées dans la leçon.

2. Le fer et les métaux ferreux ne sont plus magnétiques quand ils sont chauffés au rouge. Les électros de levage peuvent-ils être employés dans les usines métallurgiques pour manipuler les lingots d'acier incandescents ?

3. Deux postes télégraphiques Morse, distants de 50 *km*, sont reliés par une ligne simple en fer dont la résistance est de 9 *ohms* par kilomètre. Chaque prise de terre a une résistance de 25 *ohms*. La résistance de l'électro-aimant d'un récepteur est de 250 *ohms*. Une intensité de 0,020 *ampères* est nécessaire pour le fonctionnement d'un récepteur. Combien faut-il d'éléments d'accumulateurs, chacun de résistance intérieure négligeable et de f. é. m. égale à 2 *volts*, pour assurer les communications ?

Réponse : 8 éléments.

Flux magnétique.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une bobine magnétisante (voir 19e leçon).
Une boussole ou une aiguille aimantée sur pivot.
Un tire-bouchon.
Un appareil pour obtenir le spectre magnétique d'une bobine (fig. 5).
Limaille de fer.
Deux barreaux de fer (250 × 25 × 10 mm).
Deux barreaux de fer (100 × 25 × 10 mm).
Une feuille de carton coupée pour l'expérience 9.
Une batterie d'accumulateurs de trois éléments.
Un interrupteur.
Un rhéostat de quelques ohms.

LEÇON

A. — Flux magnétique dans une bobine sans noyau de fer.

1. Une bobine parcourue par un courant est comparable à un aimant.

a) ***Elle possède un pôle nord et un pôle sud.*** Voici une bobine longue par rapport à son diamètre (l = 8 à 10 d), que l'on nomme un *solénoïde*. Nous y faisons passer un courant. En approchant des extrémités une aiguille aimantée ou une boussole, nous constatons que la bobine possède un pôle nord et un pôle sud (fig. 1).

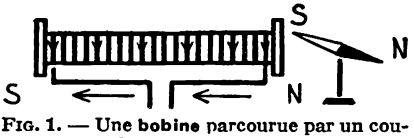


FIG. 1. — Une bobine parcourue par un courant possède un pôle nord et un pôle sud comme un aimant.

En appliquant la règle du tire-bouchon, nous pouvons déterminer la nature des pôles sans employer d'aiguille aimantée.

b) ***Rendue mobile, elle s'oriente comme un aimant.*** Nous décrirons seulement l'expérience sans la faire.

La bobine est suspendue en son milieu par un long et fin fil de soie pour tourner facilement dans un plan horizontal. Les deux extrémités de l'enroulement, rapprochées de l'axe de rotation, plongent dans deux godets concentriques contenant du mercure réunis aux deux bornes de la source de courant (fig. 2).

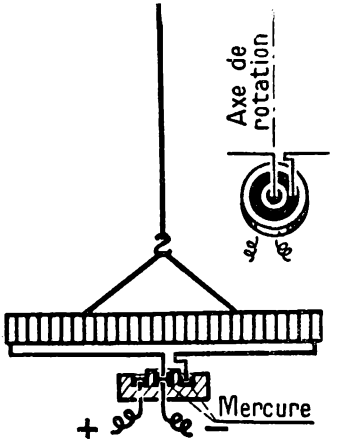


FIG. 2. — Le **solénoïde mobile** peut tourner autour d'un axe vertical sans cesser de recevoir du courant. Il s'oriente dans la direction nord-sud.

La bobine s'oriente dans la direction nord-sud, la même extrémité se tournant toujours vers le nord.

c) ***Les pôles de même nom de deux bobines***

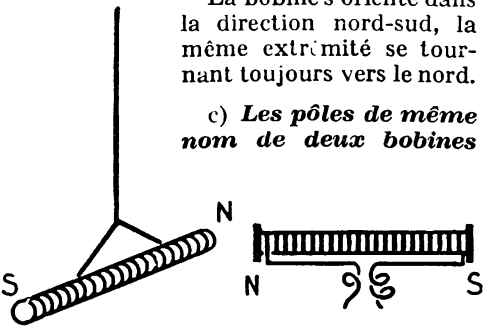


FIG. 3. — **Attraction et répulsion** entre les pôles de deux bobines.

se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent. On le montre en approchant successivement de l'un des pôles de la bobine mobile, l'un puis l'autre pôle d'une bobine tenue à la main (fig. 3).

d) ***Les pôles de même nom d'une bobine et d'un aimant se repoussent, les pôles de noms contraires s'attirent.*** L'expérience est la même que celle qui précède, la bobine tenue à la main est remplacée par un barreau aimanté (fig. 4).

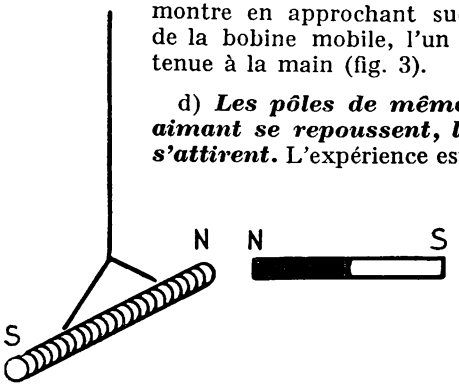


FIG. 4. — **Attraction et répulsion** entre les pôles d'une bobine et ceux d'un aimant.

2. Spectre magnétique d'une bobine.

Appareil. — Sur une feuille de fort carton ou de contre - plaqué, nous avons

tracé deux droites parallèles écartées de 80 *millimètres* et percé sur chaque ligne une vingtaine de petits trous distants de 10 *millimètres*. Avec un fort fil de cuivre passé dans ces trous, nous formons une sorte de bobine cylindrique à spires écartées, dont une moitié se trouve au-dessus de la planchette et l'autre au-dessous (fig. 5).

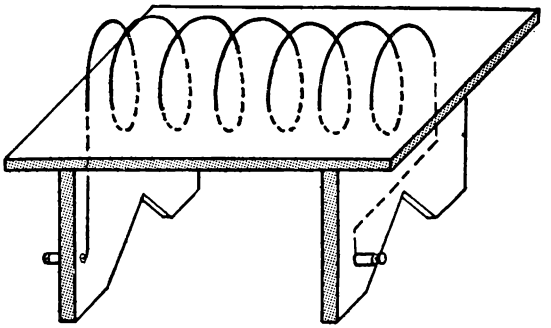


FIG. 5. — **Bobine à spires éeartées** pour former un spectre magnétique.

Expérience. Faisons passer un courant de 15 à 20 *ampères* dans la bobine et, en la maintenant horizontale saupoudrons la planchette de limaille de fer à l'intérieur et à l'extérieur de l'enroulement. *Les grains se mettent en files.* Nous facilitons cette orientation en frappant légèrement la planchette avec une règle ou un crayon pour faire sauter les grains de limaille et les rendre mobiles un instant. L'ensemble des lignes formées par la limaille est le **spectre magnétique** de la bobine.

Examinons ce spectre. — Il est formé d'un grand nombre de courbes régulières que l'on nomme *lignes de force*, produites par des grains de limaille qui se sont placés bout à bout. Chaque grain, aimanté par la bobine, est devenu une petite aiguille aimantée qui, pendant qu'elle est mobile, s'oriente sous l'action des pôles de la bobine. Les grains s'attirent les uns les autres par leurs pôles de noms contraires et se mettent en files (fig. 6).

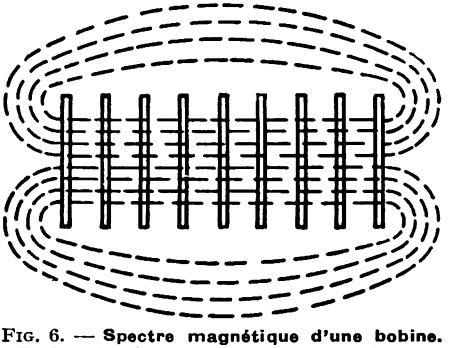


FIG. 6. — **Spectre magnétique d'une bobine.** La limaille de fer dessine les lignes de force dans un plan. Ces lignes existent dans l'espace tout autour de la bobine.

Suivons l'une des lignes de force à partir du pôle sud de la bobine. A l'intérieur de l'enroulement, c'est une ligne droite parallèle à l'axe;

en sortant du pôle nord, elle dessine une courbe régulière qui revient au pôle sud.

Remarquons : 1° que les lignes de force sont serrées les unes contre les autres et parallèles à l'axe à l'intérieur de la bobine, tandis qu'au dehors elles s'épanouissent dans un plus grand espace;

2° que nous avons montré le spectre magnétique seulement dans le plan horizontal passant par l'axe de la bobine; un spectre semblable existe dans tout autre plan passant par l'axe; la bobine est donc pleine de lignes de force qui se ferment dans l'espace tout autour du *solénoïde.*

3. Flux magnétique d'une bobine.

De l'expérience précédente on tire des notions théoriques très importantes, nécessaires pour comprendre le fonctionnement des dynamos, des moteurs et de toutes les machines électriques.

L'examen du spectre magnétique conduit à imaginer que le courant qui passe dans une bobine crée dans l'espace, à l'intérieur et à l'extérieur de la bobine, un **flux magnétique.** A ce flux, dont les lignes de force indiquent la direction en chaque point de l'espace, on attribue un sens : par convention **il va, à l'extérieur de la bobine, du pôle nord au pôle sud.**

a) ***A l'intérieur du solénoïde,*** la grandeur du flux est proportionnelle :

1° à l'*intensité I du courant* dans la bobine;

2° au *nombre de spires* n_1 par *mètre de longueur* de l'enroulement;

3° à la *surface S*, exprimée en *mètres carrés* de la section droite de la bobine.

On désigne le flux par la majuscule grecque Φ, qui s'énonce *phi*, et l'on démontre que :

$$\Phi = \frac{1{,}25\, n_1 \mathrm{IS}}{1\,000\,000} \qquad \Phi = 1{,}25\, n_1 \mathrm{IS}.10^{-6} \qquad \textbf{(1)}$$

L'unité de flux est le **wéber** (1).

Exemple. — *Calculer le flux magnétique à l'intérieur d'une bobine dont la section est* 20 centimètres carrés, *la longueur* 30 centimètres *et qui porte* 480 *spires parcourues par un courant de* 4 ampères.

Le nombre de spires par mètre est $n_1 = 480 : 0{,}30 = 1\,600$. En appliquant la formule (1) on obtient :

$$\Phi = 1{,}25 \times 1\,600 \times 4 \times 0{,}002 \times 10^{-6} = 16.10^{-6} \textit{ wébers.}$$

---

1. Définition précise page 220.

Le produit $\mathbf{In_1}$ est un **nombre d'ampères-tours par mètre** (*At/m*). On le nomme intensité du **champ magnétique** ou plus brièvement champ à l'intérieur de la bobine.

Le rapport $\Phi : S$, qui est la *densité du flux magnétique* est appelé **induction magnétique** $\mathcal{B}$. On mesure cette grandeur en **tesla** ou **wéber par mètre carré.** Il en résulte que l'induction à l'intérieur de la bobine est :

$$\underset{teslas}{\mathcal{B}} = \frac{\Phi}{S}\,\frac{wébers}{m^2} \qquad \underset{teslas}{\mathcal{B}} = 1{,}25\, n_1 I . 10^{-6}\ \underset{At/m}{} \qquad (2)$$

Remarque : Le wéber est une unité très grande. On utilise également le **maxwell** qui vaut un cent-millionème de wéber :

1 *wéber* = 10⁸ *maxwells*.

On exprime parfois les inductions en **gauss**, qui correspond à un *maxwell par centimètre carré*. On a alors la relation :

1 *tesla* = 10 000 *gauss*.

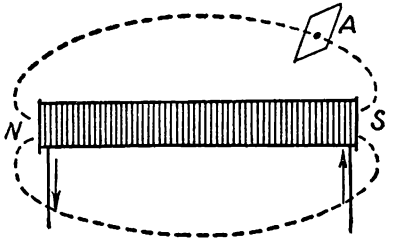


FIG. 7. — **Le flux au point A** à travers la surface S normale aux lignes de force est $\Phi = \mathcal{B}.S$.

b) ***A l'extérieur de la bobine,*** le flux magnétique, qui conserve au total la même valeur, s'épanouit dans un espace beaucoup plus grand qu'à l'intérieur du solénoïde. Il en résulte qu'en un point quelconque A (fig. 7), l'induction est plus faible que dans la bobine. Sa valeur $\mathcal{B}$ *teslas* varie suivant la position du point A.

A travers une surface de S *mètres carrés*, perpendiculaire aux lignes de force et dans laquelle on suppose le champ constant, le flux Φ a encore pour valeur

$$\Phi = \mathcal{B}.S.$$

B. — Flux magnétique dans une bobine à noyau de fer.

4. La présence d'un noyau de fer augmente le flux magnétique.

Installons une bobine perpendiculairement à l'aiguille d'une boussole, l'axe de la bobine est horizontal et passe à peu près par le pivot de l'aiguille; boussole et bobine sont assez loin l'une de l'autre,

1 *mètre* par exemple, pour que l'aiguille ne dévie qu'à peine quand un courant d'intensité invariable passe dans la bobine (fig 8).

Introduisons une tige de fer dans la bobine : **la boussole dévie fortement.**

Nous en concluons que les effets magnétiques de la bobine ont été beaucoup renforcés par le noyau de fer.

5. Le fer canalise le flux magnétique.

A l'intérieur d'une bobine, mettons un barreau de fer que nous prolongeons à l'extérieur par trois barreaux plus courts disposés en équerre (fig. 9). Entre les extrémités des tiges de fer, nous laissons un

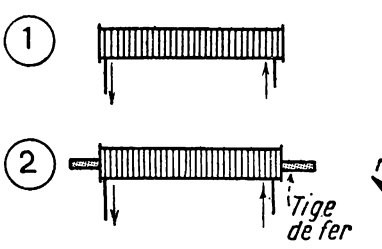


FIG. 8. — 1. La bobine agit à peine sur l'aiguille aimantée.
2. Un barreau de fer introduit dans la bobine **augmente** le flux magnétique.

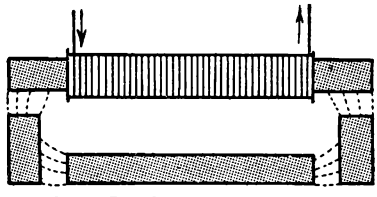


FIG. 9. — Les barreaux de fer **canalisent** le flux magnétique. Les lignes de force sont visibles dans les entrefers.

petit espace nommé **entrefer.** Une feuille de carton rigide, coupée pour pénétrer dans la bobine, couvre les barreaux.

Faisons passer un courant d'une dizaine d'ampères dans la bobine et, avec la limaille de fer, formons le spectre magnétique du dispositif.

Nous constatons que les lignes de force n'apparaissent pas sur les barreaux, qu'elles sont nombreuses, serrées et droites dans les entrefers, qu'il n'en existe qu'un petit nombre en dehors de l'ensemble des barreaux.

Nous en concluons que **le fer canalise le flux magnétique,** ou, en d'autres termes, que le flux s'établit plus facilement et plus abondamment dans le fer que dans l'air.

Nous allons préciser les conclusions du paragraphe 4 en les exprimant par des relations algébriques.

6. Flux magnétique dans un anneau de fer.

Sur un anneau de fer, complètement fermé, on enroule **régulièrement,** en spires jointives, un fil conducteur isolé.

On établit un courant dans l'enroulement, on essaye de former, avec de la limaille, le spectre magnétique de l'ensemble : il n'y a pas de spectre magnétique, il n'y a pas de lignes de force.

Le flux est maintenu à l'intérieur du fer (fig. 10 *a*), il ne se manifeste par des lignes de force que si un entrefer coupe l'anneau (fig. 10 *b*).

Ce flux caché dans le fer, est encore un **flux d'induction.** On l'évalue en **wébers** ou en **maxwells.**

Le flux par mètre carré de section droite du fer se nomme encore **induction magnétique** ou plus brièvement **induction** $\mathcal{B}$.

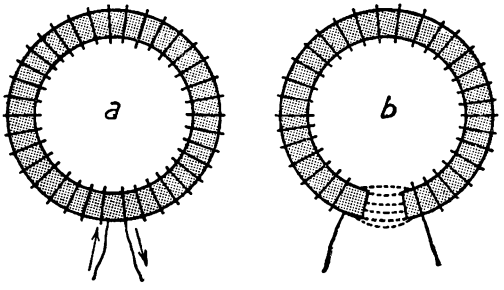


FIG. 10. — Quand on aimante un **anneau de fer** avec une bobine à spires jointives enroulées sur tout le noyau, le flux reste à l'intérieur du fer. Il se montre s'il existe un entrefer.

On admet que les lignes de force qui existent dans un entrefer se continuent de part et d'autre dans le fer, les lignes de force sont des **lignes d'induction.**

On appelle toujours *champ magnétique* le nombre d'At/m de la bobine magnétisante.

Perméabilité du fer. — Si la bobine en anneau n'avait pas de noyau de fer, le flux à l'intérieur serait :

$$\Phi = 1{,}25 . \mathrm{In_1} . \mathrm{S} . 10^{-6}.$$

Quand elle renferme du fer, on peut mesurer le flux Φ' dans le noyau qui emplit la bobine, par exemple avec une espèce de galvanomètre que l'on nomme *fluxmètre.*

Pour le même nombre d'At/m, c'est-à-dire le même champ $n_1 I$, Φ' est en général beaucoup plus grand que Φ. Le rapport $\Phi' : \Phi$ se nomme la **perméabilité relative** du fer. La perméabilité est représentée par la lettre grecque μ (mu). Donc :

$$\Phi' = \mu \Phi. \qquad (4)$$

Divisons les deux membres de cette relation par S, surface de la section droite de la bobine et de son noyau :

$$\frac{\Phi'}{S} = \mu \frac{\Phi}{S}. \qquad (5)$$

$\Phi : S$ est l'induction $\mathcal{B}_0$ dans la bobine sans noyau de fer, $\Phi' : S$ est l'induction $\mathcal{B}$ dans le noyau de fer placé dans la même bobine. La relation (5) devient : $\mathcal{B} = \mu \mathcal{B}_0$.

L'induction dans le fer est égale au produit de l'induction dans l'air par la perméabilité du fer.

La perméabilité d'un métal ferreux n'est pas constante : elle est grande quand l'induction est faible, c'est-à-dire quand le métal est peu aimanté; elle diminue beaucoup quand l'induction croît. Par exemple, pour une tôle d'acier employée dans la construction électrique, $\mu = 2\,000$ quand $\mathcal{B} = 1$ *tesla* et $\mu = 60$ quand $\mathcal{B} = 2$ *teslas*.

Remarque. — Le flux d'un aimant permanent se maintient sans dépense d'énergie. De même s'il s'agit du flux dans une bobine parcourue par un courant avec ou sans noyau de fer : en régime permanent, l'énergie fournie par le courant est seulement égale à l'énergie dissipée en chaleur Joule à cause de la résistance du conducteur.

RÉSUMÉ

1. — Une bobine parcourue par un courant est comparable à un aimant : elle a des pôles et s'oriente dans la direction nord-sud, les pôles d'une bobine repoussent les pôles de même nom d'une autre bobine ou d'un aimant et attirent les pôles de noms contraires.

2. — Le courant crée dans la bobine et autour d'elle un *flux magnétique* qui va, à l'extérieur de la bobine, du pôle nord au pôle sud en suivant le trajet des lignes de force.

La valeur du flux est :

$$\Phi = \mathcal{B}S \text{ wébers}$$

et l'induction $\mathcal{B}$ vaut à l'intérieur de la bobine :

$$\mathcal{B} = 1{,}25\, n_1 I . 10^{-6} \text{ teslas.}$$

3. Un noyau de fer mis dans une bobine augmente et canalise le flux.

L'induction $\mathcal{B}$ et le flux Φ' à travers une surface S sont encore liés par la relation : $\Phi' = \mathcal{B} \times S$ **wébers.**

4. — On nomme *perméabilité relative* d'un métal ferreux le nombre μ qui indique combien de fois le flux dans le métal est plus grand que le flux dans l'air dont il tient la place, à égalité d'ampères-tours par mètre :

$$\Phi' = \mu \Phi$$
$$\mathcal{B} = \mu \mathcal{B}_0.$$

La perméabilité décroît quand l'induction augmente.

EXERCICES

1. **Produire, sur du papier Ozalid, le spectre magnétique :**

1° d'un aimant droit,
2° d'un aimant en fer à cheval,
3° d'un aimant en fer à cheval avec son armature en laissant un grand entrefer entre les pôles et l'armature.

2. Pour produire une induction de 1,6 *teslas* dans un anneau fait de couronnes de tôles empilées, il faut 32 ampères-tours par centimètre. Calculer la perméabilité de cette tôle.

Réponse : 400.

3. Pour produire une induction de 1 tesla dans des anneaux fermés, il faut 4 *At/cm* quand l'anneau est en tôles, 5 *At/cm* s'il est en acier coulé, 100 *At/cm* s'il est en fonte. Calculer la perméabilité des trois métaux pour l'induction 1 *tesla*.

Réponses : 2 000 — 1 600 — 80.

4. La force portante d'un pôle d'électro-aimant est donnée par la formule

$$F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi \times 981\,000}$$

dans laquelle F est exprimée en kilogrammes-poids, $\mathcal{B}$, l'induction dans le noyau, en *gauss*, S, la section du noyau, en *centimètres carrés*.

Montrer que cette formule est équivalente à la suivante :

$$\underset{newtons}{F} = \frac{10^7}{8\pi} \underset{teslas}{\mathcal{B}^2} \underset{m^2}{S}$$

Un électro-aimant en fer à cheval a des pôles cylindriques dont le diamètre est 25 *millimètres*. Calculer l'induction dans ces pôles quand la force portante totale de l'électro est 100 *kilogrammes-poids*. (Donner le résultat avec 3 chiffres significatifs seulement.)

Réponse : 15 800 *gauss* ou 1,58 *tesla*.

Aimantation des métaux ferreux. Circuit magnétique.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Les mesures qui suivent ne sont possibles que si l'on possède l'instrument convenable : un fluxmètre. *Faute de cet instrument on se contentera, par exception, d'étudier avec attention la description des mesures dans le texte de la leçon.*

LEÇON

1. On sait mesurer les flux magnétiques.

Les mesures de flux renseignent les constructeurs de machines électriques sur les propriétés magnétiques des matériaux qu'ils emploient. Parce qu'elles sont sans utilité pour les électriciens qui utilisent le matériel électrique mais ne le fabriquent pas, nous ne les étudierons pas.

Actuellement on emploie surtout pour mesurer les flux des *galvanomètres balistiques* dont un type spécial nommé *fluxmètre* est aussi commode à employer qu'un ampèremètre. Le flux dont on désire connaître la valeur est soit établi, soit supprimé, soit inversé dans une bobine de quelques spires connectée au fluxmètre dont l'aiguille dévie sur une échelle et donne la valeur cherchée (fig. 1).

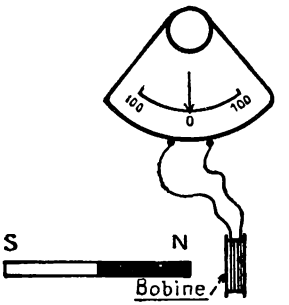


FIG. 1. — Schéma d'un **fluxmètre** avec sa bobine de mesure. Pour mesurer le flux sortant du pôle nord d'un aimant, il suffit d'enfoncer l'aimant jusqu'à son milieu dans la bobine et de lire l'indication de l'aiguille de l'instrument.

A. — Courbe d'aimantation d'un métal ferreux.

2. Aimantation d'une tôle pour construction électrique.

a) ***Dispositif expérimental.*** — Un anneau est fabriqué en empilant

des couronnes de tôle. On calcule sa section droite S *centimètres carrés* et sa longueur moyenne *l centimètres.*

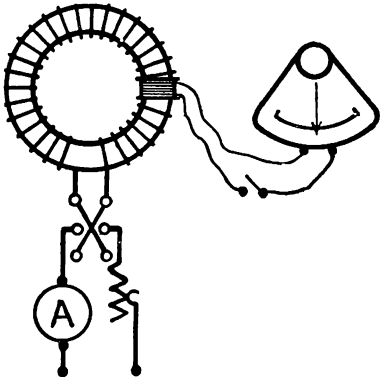


FIG. 2. — Un fluxmètre est monté sur l'anneau pour mesurer le flux d'induction.

Sur le fer, on enroule régulièrement, en spires jointives, un conducteur isolé. On forme ainsi une bobine en anneau, pleine de fer, dont on compte le nombre de spires *n*. Le nombre de spires par centimètre est

$$n_1 = n : l.$$

Le circuit est alimenté par une batterie d'accumulateurs avec, en série, un ampèremètre, un rhéostat et un inverseur.

Une bobine de quelques spires, enroulée sur la bobine d'aimantation, est connectée au fluxmètre (fig. 2).

TOLES ÉLECTRIQUES qualité ordinaire

$\mathcal{B}$ *teslas*	*At/m*
0,5	200
0,6	240
0,7	280
0,8	320
0,9	360
1	400
1,1	540
1,2	700
1,3	1 000
1,4	1 400
1,5	2 000
1,6	3 200
1,7	5 600
1,8	9 000
1,9	15 600
2	26 000
2,1	46 000
2,2	90 000
2,3	175 000

ACIER COULÉ

$\mathcal{B}$ *teslas*	*At/m*
0,5	250
0,6	300
0,7	350
0,8	400
0,9	450
1	500
1,1	600
1,2	750
1,3	1 100
1,4	1 500
1,5	2 500
1,6	4 300
1,7	7 000
1,8	11 200
1,9	18 000
2	28 000

FONTE GRISE ordinaire

$\mathcal{B}$ *teslas*	*At/m*
0,1	400
0,2	800
0,3	1 200
0,4	1 700
0,5	2 400
0,6	3 200
0,7	4 200
0,8	5 600
0,9	7 600
1	10 000
1,1	13 600
1,2	18 600
1,3	26 500

b) ***Mesure.*** — Pour effectuer une mesure, on fait passer un courant I dans la bobine en anneau; l'aimantation est donc produite par In_1 *At/m.* Le fluxmètre étant au zéro de sa graduation, on inverse le courant magnétisant. Le flux change de sens, mais conserve la même valeur absolue. Le fluxmètre indique la variation de flux, soit 2 Φ.

Donc, on connaît Φ et par conséquent l'induction $\mathcal{B} = \Phi : S$ correspondant à In_1 *At/m.*

c) ***Résultats.*** — De telles mesures sont faites pour différentes valeurs de In_1. Le tableau ci-contre réunit les résultats obtenus.

3. Examen de la courbe d'aimantation.

Une courbe parle mieux aux yeux qu'un tableau de nombres. Traçons la courbe de l'induction $\mathcal{B}$ en portant les ampères-tours par mètre en abscisses et les valeurs correspondantes de $\mathcal{B}$ en ordonnées.

La figure 3 représente une partie de cette courbe dite **courbe d'aimantation** de la tôle étudiée.

Elle débute par une partie rectiligne OA, se continue par un arc de courbe AB, puis redevient presque rectiligne dans la région BC avec une pente beaucoup plus faible qu'au départ.

Au début, jusqu'à 1 *tesla*, l'*induction croît proportionnellement* au nombre d'ampères-tours par mètre, que nous avons nommé *champ magnétisant*, on dit que *le fer n'est pas saturé.*

La partie courbe est appelée *coude de saturation.*

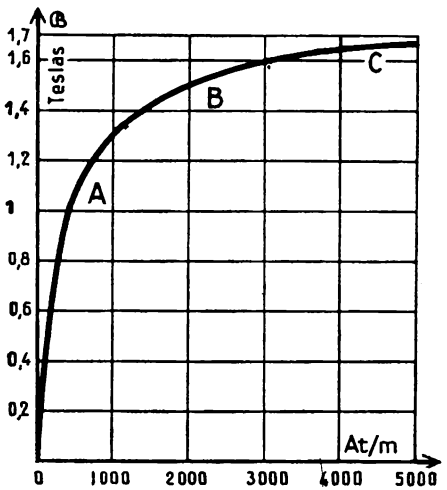


FIG. 3. — **Courbe d'aimantation** d'un anneau en tôles d'acier.
OA, partie rectiligne : *l'acier n'est pas saturé*;
AB, partie courbe : *coude de saturation;*
BC, partie presque rectiligne : *l'acier est presque saturé.*

Dans la partie qui suit le coude, il faut augmenter beaucoup le champ magnétisant pour obtenir une faible augmentation de l'induction : *le fer est saturé.*

Tableau ou courbe permettent de répondre à deux sortes de questions :

1° *Quelle est l'induction produite dans la tôle par un nombre déterminé d'**At/m**?* Par exemple pour 5 000 *At/m*, on trouve 1,68 *teslas*.

2° *Combien faut-il d'**At/m** pour obtenir une induction déterminée?* Pour obtenir 1,5 *teslas*, il faut 2 000 *At/m*.

4. Les courbes d'aimantation des différents métaux ferreux ne sont pas identiques.

a) En étudiant la fonte grise ordinaire on obtient le tableau (p. 204). Il montre que pour produire une certaine induction dans la fonte, il faut un champ magnétisant beaucoup plus grand que pour la tôle électrique, 25 fois plus, par exemple, s'il s'agit d'obtenir 1 *tesla*.

La fonte est donc un mauvais métal magnétique. Aussi dans la construction électrique actuelle ne l'emploie-t-on plus que comme support.

Les organes de machines traversés par un flux d'induction sont faits en tôle d'acier ou en acier coulé, bien que les tôles soient chères et l'acier plus difficile à couler et à usiner que la fonte.

b) Le tableau des résultats de l'aimantation de l'acier coulé indique que l'acier coulé s'aimante à peu près comme la tôle d'acier.

Il ne faut d'ailleurs pas attribuer aux nombres des tableaux et aux courbes qui les traduisent une grande précision. Pour un même champ magnétisant, l'induction varie parfois de 5 ou 6 % d'un échantillon à un autre d'un même métal. Cette approximation suffit pratiquement.

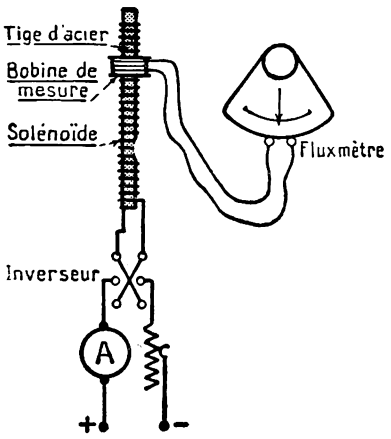


FIG. 4. — Dispositif expérimental pour obtenir le **cycle d'hystérésis** d'un barreau d'acier.

B. — Cycle d'hystérésis d'un métal ferreux.

5. Soumettons une tige d'acier doux à une aimantation alternative.

a) ***Dispositif expérimental.*** — Le barreau étudié est une tige d'acier doux carrée de 1 *centimètre* de côté, longue de 50 *centimètres*,

250 spires du fil sont enroulées sur ce noyau, soit 5 spires par centimètre.

Un courant est réglé jusqu'à 8 *ampères* par un rhéostat et mesuré avec un ampèremètre, un inverseur est placé dans le circuit (fig. 4). On convient de marquer du signe + les intensités du courant quand il passe dans un certain sens et du signe — ses intensités en sens contraire. On peut donc faire varier le champ magnétisant entre + 4 000 *At/m* et — 4 000 *At/m*.

Une petite bobine mobile de 50 spires glisse sur le barreau pardessus l'enroulement. Elle est connectée à un fluxmètre. Pour mesurer le flux dans le barreau, la bobine, d'abord placée au milieu du barreau, est retirée et éloignée; le fluxmètre indique la valeur du flux supprimé, on en déduit la valeur de l'induction dans l'acier puisque la section du barreau est 1 *centimètre carré*.

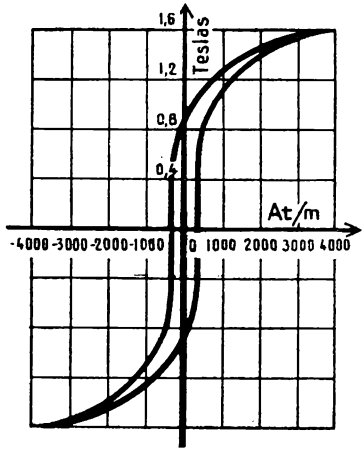


FIG. 5. — **Cycle d'hystérésis** d'un barreau d'acier doux. L'*induction rémanente* est 0,86 *tesla* et le *champ coercitif* 330 *At/m*.

b) ***Mesure.*** — On part du champ le plus élevé, soit + 4 000 *At/m*, on le diminue jusqu'à zéro, on manœuvre l'inverseur et on continue à décroître le champ jusqu'à

CHAMP DÉCROISSANT	
At/m	$\mathcal{B}$ *teslas*
4 000	1,6
3 000	1,55
2 000	1,48
1 000	1,32
0	0,86
— 1 000	— 1,16
— 2 000	— 1,43
— 3 000	— 1,52
— 4 000	— 1,6

CHAMP CROISSANT	
At/m	$\mathcal{B}$ *teslas*
— 4 000	— 1,6
— 3 000	— 1,55
— 2 000	— 1,48
— 1 000	— 1,32
0	— 0,86
1 000	1,16
2 000	— 1,43
3 000	1,52
4 000	1,6

— 4 000 *At/m*. On mesure l'induction produite par les champs extrêmes et quelques champs intermédiaires.

Ensuite on fait croître le champ pour le ramener à + 4 000 *At/m* en effectuant aussi plusieurs mesures d'induction.

Les résultats des deux séries de mesures sont indiqués dans les deux tableaux qui précèdent ou représentés par la courbe figure 5.

Cette courbe fermée est le **cycle d'aimantation** de l'acier doux étudié.

6. Examinons ce cycle d'aimantation.

a) A une valeur déterminée du champ magnétisant correspondent deux valeurs de l'induction relatives, l'une au champ croissant, l'autre plus grande en valeur absolue au champ décroissant.

En d'autres termes, l'*induction est en retard sur le champ qui la produit.* Il ne s'agit pas d'un retard dans le temps, mais d'un retard dans la grandeur des effets du courant magnétisant. On donne à ce phénomène le nom d'**hystérésis** tiré d'un mot grec qui signifie retard.

Le cycle d'aimantation est souvent nommé **cycle d'hystérésis.**

b) La figure indique que le champ magnétisant étant annulé, une induction dite **induction rémanente** subsiste dans le métal. Pour qu'elle disparaisse, il faut faire agir sur le barreau un champ magnétisant dit **champ coercitif,** de sens contraire au précédent.

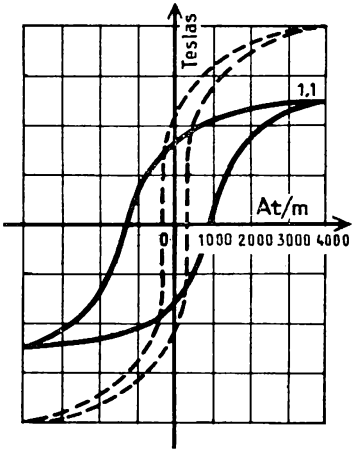


FIG. 6. — Comparaison du *cycle d'hystérésis* d'une barre d'acier dur trempé (trait continu), au cycle d'hystérésis d'une barre d'acier doux (pointillé).

Dans l'acier étudié, l'induction rémanente est 0,86 *tesla*, le champ coercitif environ 330 *At/m*.

7. Le cycle d'hystérésis de l'acier dur trempé n'a pas la même forme que celui de l'acier doux.

Ces deux courbes sont rapprochées dans la figure 6.

Leur comparaison vous montre que, pour un champ déterminé, l'induction est plus faible dans l'acier trempé que dans l'acier doux.

L'*induction rémanente* est un peu moindre.

Mais le *champ coercitif* est beaucoup plus grand. L'acier trempé se désaimante difficilement : il est propre à la fabrication d'aimants permanents.

8. L'hystérésis produit un dégagement de chaleur.

L'hystérésis a pour conséquence un dégagement de chaleur dans le fer, quand il est soumis à de nombreux cycles successifs d'aimantation.

La perte de puissance qui en résulte dans les machines électriques est de l'ordre de 3 *watts* par kilogramme d'acier ordinaire soumis à une induction variant entre + 1 *tesla* et — 1 *tesla* à raison de 50 cycles par seconde.

On réduit cette perte en employant à la construction des machines électriques des tôles d'acier au silicium. Celles qui sont destinées au matériel à courant alternatif contiennent jusqu'à 4 % de silicium.

C. — Circuit magnétique.

9. Voici un exemple simple de circuit magnétique.

Un **circuit magnétique** est l'ensemble des corps dans lesquels existe un flux magnétique fermé sur lui-même.

Le flux est comparable au *courant* qui circule dans un circuit électrique. Les ampères-tours magnétisants constituent la *force magnéto-motrice*. Les diverses parties d'un circuit magnétique opposent à l'établissement du flux une sorte de résistance nommée *réluctance* qui dépend de leur perméabilité, de leur section, de leur longueur.

La carcasse d'un électro-aimant est un exem-

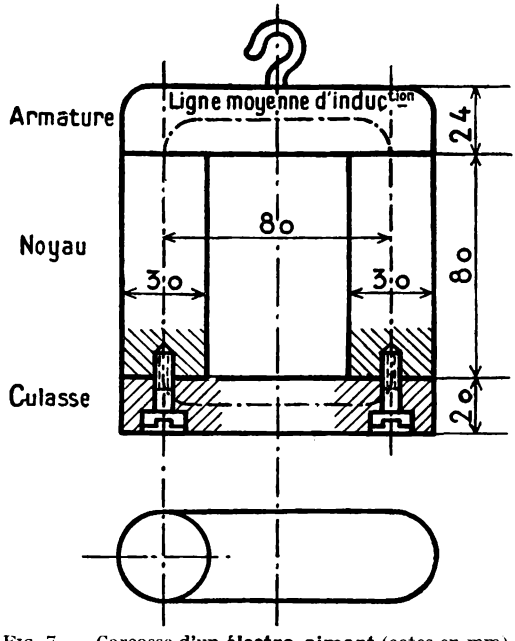


FIG. 7. — Carcasse **d'un électro-aimant** (cotes en mm)

ple de circuit magnétique (fig. 7). Vous savez qu'elle comprend deux noyaux, une culasse et une armature. La culasse est solidement vissée sur les noyaux, l'armature est seulement posée sur les pôles. Les joints entre ces pièces, même usinés avec beaucoup de soins, laissent entre elles un intervalle d'air, dit *entrefer*, bien moins perméable au flux que le métal massif. Il y a au total quatre entrefers.

10. Problème principal d'un circuit magnétique.

Il consiste à *déterminer le nombre d'ampères-tours nécessaires pour obtenir dans le circuit un flux de valeur fixée* Φ.

Il est facile à résoudre. On calcule l'*induction* dans chaque partie du circuit. Les courbes d'aimantation donnent le nombre d'*At/m* nécessaires pour produire cette induction. On calcule le nombre d'*At* pour chaque partie du circuit dont la longueur est connue. On fait la somme des résultats.

Par exemple, proposons-nous de déterminer le nombre d'ampères-tours à placer sur les noyaux de l'électro-aimant représenté par la figure 7 pour que l'*induction dans les noyaux* soit 1,5 *teslas*. L'électro-aimant est fabriqué en acier doux forgé dont la courbe d'aimantation se confond à peu près avec celle de l'acier coulé.

1° ***Noyaux.*** — La courbe d'aimantation indique qu'il faut 2 500 *At/m* pour obtenir 1,5 *teslas*. Pour les deux noyaux, longs chacun de 8 *cm*, on emploie donc :

$$2\,500 \times 0{,}08 \times 2 = 400 \text{ At.}$$

2° ***Armature.*** — Les noyaux ont une section de 7 cm^2. Le flux dans le circuit est : $\Phi = \mathfrak{B} \times S = 1{,}5 \times 7.10^{-4} = 10{,}5.10^{-4}$ *wébers*.

Dans l'armature, dont la section est 7,2 cm^2, la valeur de l'induction est :

$$10{,}5.10^{-4} : 7{,}2.10^{-4} = 1{,}45 \text{ teslas.}$$

Le champ magnétisant nécessaire est 2 200 *At/m*. La longueur moyenne d'une ligne d'induction dans l'armature atteint 9,3 *cm*. Pour l'aimantation de l'armature on doit donc compter :

$$2\,200 \times 0{,}093 = 205 \text{ At.}$$

3° ***Culasse.*** — Sa section est 6 cm^2. L'induction y atteint :

On l'obtient avec 9 500 *At/m*. La longueur moyenne des lignes d'induction y étant 9,1 *cm*, la culasse exige :

$$9\,500 \times 0{,}091 = 865 \text{ At.}$$

4° ***Entrefers*** — Pour une induction de 1,5 *teslas* dans l'air, il faut :

$$1{,}25\, n_1 I.10^{-6} = 1{,}5$$

d'où :

$$n_1 I = \frac{1{,}5}{1{,}25}\, 10^6 = 1\,200\,000 \text{ At/m.}$$

En comptant chaque entrefer d'une longueur de 0,1 *mm*, la longueur des quatre est 0,04 *cm*. Cette partie du circuit demande :

$$1\,200\,000 \times 0{,}0004 = 480 \text{ } At.$$

Le nombre total d'ampères-tours magnétisants à fournir par les bobines de l'électro-aimant s'élève donc à :

$$405 + 200 + 865 + 480 = 1\,950 \text{ } \textit{ampères-tours}.$$

On réduirait ce nombre en augmentant la section de la culasse dans laquelle l'induction est un peu trop grande.

Remarque. — Signalons une différence importante entre un circuit électrique et un circuit magnétique. Le courant électrique demeure tout entier dans le conducteur d'un circuit électrique isolé. Dans un circuit magnétique avec un entrefer, surtout si l'induction est élevée, une partie du flux magnétique se ferme dans l'air hors de l'entrefer. On dit qu'il y a des *fuites magnétiques* dans le circuit.

Si le *flux total* produit par le champ magnétisant est Φ' alors que le *flux utile* est Φ, puisque l'on a $\Phi' > \Phi$, on peut écrire :

$$\Phi' = k\Phi$$

k étant un nombre plus grand que 1 que l'on nomme **coefficient de fuites** ou *coefficient d'Hopkinson*. Par exemple, ce coefficient est 1,30 dans certaines dynamos.

RÉSUMÉ

1. — On obtient la *courbe d'aimantation* d'un échantillon d'acier doux en le soumettant à des champs magnétisants ; dont on mesure la valeur en *At/m* et en même temps l'induction produite dans le métal.

Cette courbe présente trois parties : au début, l'induction croît très vite proportionnellement au champ magnétisant, ensuite l'induction croît plus lentement et n'est plus proportionnelle au champ ; enfin le fer se sature.

2. — On trace des courbes d'aimantation pour les différents métaux ferreux employés dans la construction électrique.

3. — En soumettant un métal magnétique à un champ magnétisant alternatif, on peut tracer son *cycle d'hystérésis*.

Cette courbe indique que l'aimantation est en retard sur le champ qui la produit. Elle montre aussi l'existence d'une *induction rémanente* et d'un *champ coercitif*.

L'hystérésis cause dans les organes de machines une perte d'énergie par production de chaleur.

4. — Pour obtenir les ampères-tours magnétisants nécessaires pour créer un certain flux dans un circuit magnétique, on calcule le nombre d'ampères-tours qu'il faut pour produire l'induction voulue dans chaque partie du circuit magnétique et l'on fait la somme des résultats.

EXERCICES

1. Tracer sur du papier millimétrique ou du papier quadrillé :

1° la courbe d'aimantation de l'acier coulé;
2° la courbe d'aimantation de la fonte grise.

2. Combien faut-il d'*At/m* pour obtenir 0,8 *tesla* dans un anneau dont la section est 25 cm^2 :

1° en fonte,
2° en acier coulé.

Réponses : 1° 5 600 *At/m*; 2° 400 *At/m.*

3. Un anneau de tôles d'acier de 28 *cm* de diamètre moyen, de section 2 × 2 *cm* est recouvert d'un enroulement de 1 584 spires. Calculer l'intensité du courant à faire passer dans le bobinage pour obtenir un flux de 0,72 *mWb* dans l'anneau.

Réponse : 5 *ampères.*

4. Dans l'anneau de l'exercice précédent, on pratique un entrefer de 5 *mm.* Calculer l'intensité du courant d'aimantation pour produire le même flux de 0,72 *milliwéber.*

Réponse : environ 10 *ampères.*

5. En suivant l'ordre des calculs du paragraphe 9 de la 22e leçon, déterminer le nombre d'ampères-tours nécessaires pour obtenir un flux de 0,7 *milliwéber* dans les noyaux de l'électro-aimant de la figure 7. Cet électro-aimant est en acier doux dont la courbe d'aimantation est à peu près celle de l'acier coulé.

Réponse : environ 508 *At.*

5. INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

23e LEÇON

Courants induits.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un électro-aimant du modèle de la figure 10.
Une batterie d'accumulateurs de trois éléments.
Un rhéostat d'une dizaine d'ohms.
Un interrupteur.
Une bobine de 100 *spires enroulées en toron, de fil isolé de* 0,5 mm *de diamètre, diamètre de la bobine :* 50 mm.
Un milliampèremètre avec zéro au milieu de l'échelle, ou 1 *galvanomètre du modèle de la figure* 11.
Pièces de transformateur démontable monophasé, savoir :
deux bobines de 360 *spires,*
une bobine de 90 *spires,*
une traverse.
*Une ampoule type lampe de poche (*4,5 *volts ou* 8 *volts).*

LEÇON

A. — Production des courants induits.

1. Production de courants induits avec un électro-aimant.

a) ***Appareil.*** — Les deux extrémités d'une bobine plate d'une centaine de spires de fil fin sont connectées aux bornes d'un milliampèremètre [1] dont le zéro est au milieu de l'échelle.

1. A défaut de milliampèremètre, on peut employer un galvanomètre qu'il est possible de construire (fig. 2).

Aucune force électromotrice n'existe dans ce circuit fermé et le milliampèremètre n'indique aucun courant.

Nous disposons d'un électro-aimant dont les noyaux se continuent par des pièces polaires laissant entre elles un entrefer d'environ 2 *centimètres*. Un flux magnétique important existe dans cet entrefer (fig. 1).

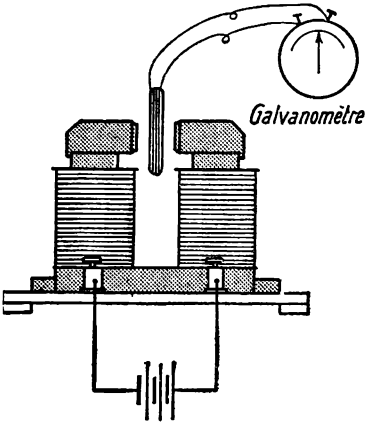


FIG. 1. — **Un courant se produit dans le circuit** quand on introduit la bobine entre les pôles de l'électro-aimant et aussi quand on l'en retire.

b) ***Expériences.*** — 1° Introduisons rapidement la bobine plate dans l'entrefer (fig. 1). L'aiguille du milliampèremètre dévie, par exemple *à droite*.

Donc un courant s'est produit dans le circuit fermé constitué par la bobine et le milliampèremètre.

Le courant cesse dès que la bobine est arrivée entre les pièces polaires.

2° Retirons la bobine de l'entrefer. L'aiguille du milliampèremètre dévie *à gauche*. Un bref courant s'est produit à nouveau, il est de sens contraire au précédent.

3° Retournons la bobine pour que la face qui était à notre droite soit à gauche et recommençons les deux expériences précédentes : dans chacune, le courant produit est du sens contraire à celui que nous avions constaté d'abord.

4° Mettons un rhéostat en série avec l'électro-aimant et laissons la bobine *immobile* entre les pièces polaires. Augmentons le courant dans l'électro-aimant : l'aiguille du milliampèremètre indique un courant d'un certain sens. Diminuons le courant : l'aiguille du milliampèremètre se déplace dans l'autre sens.

c) ***Conclusion.*** — Les courants que nous avons produits dans les expériences précédentes sont des **courants induits.** La bobine dans laquelle nous les avons obtenus est la **bobine induite.** L'électro-aimant constitue l'**inducteur.**

Le phénomène de production de ces courants induits se nomme **induction électromagnétique**[1].

---

1. Ne pas confondre l'*induction électromagnétique*, production de courants induits, avec l'*induction magnétique*, flux par centimètre carré dans un métal ferreux aimanté.

2. Quelle est la cause des courants induits?

Vous vérifierez facilement que, dans les expériences que nous venons d'effectuer, nous avons fait varier le flux magnétique qui traverse la bobine induite, soit en l'établissant, soit en le supprimant en déplaçant la bobine, soit en augmentant ou en diminuant le courant inducteur.

Qu'un flux qui passe à travers un circuit fermé soit grand ou petit, s'il demeure constant, il n'induit pas de courant; s'il croît ou décroît, un courant induit parcourt le circuit.

Un courant induit se produit dans un circuit électrique fermé quand un flux magnétique **varie** *à travers ce circuit.*

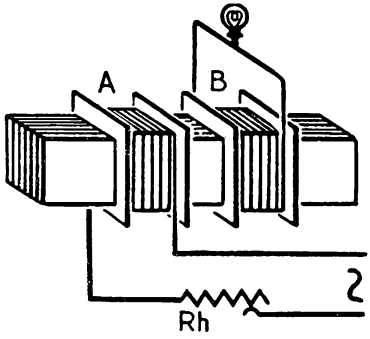


FIG. 2. — La bobine A, parcourue par le courant alternatif du secteur, induit un courant dans la bobine B.

Maintenant que vous connaissez le mécanisme de production des courants induits, vous pouvez imaginer facilement d'autres expériences d'induction que celles qui précèdent, par exemple :

1° établir ou supprimer le courant dans l'électro-aimant inducteur sans toucher au circuit induit;

2° introduire un pôle d'aimant permanent dans la bobine induite ou le retirer;

3° placer tout près de la bobine induite une bobine inductrice dans laquelle on fait varier un courant;

4° enfiler, sur un noyau fait d'un paquet de tôles, une bobine inductrice A alimentée par le courant alternatif du vecteur et une bobine induite B ayant moins de spires, fermée sur une ampoule de lampe de poche (fig. 2).

B. — Lois de l'induction électromagnétique.

3. Durée du courant induit.

Reprenons une expérience précédente en faisant varier lentement, avec un rhéostat, le courant dans l'électro-aimant, donc le flux inducteur.

Vous constatez que le courant induit persiste pendant toute la manœuvre du rhéostat.

Donc : *le courant induit dure autant que la variation du flux inducteur.*

4. Sens du courant induit.

Enfilons l'une près de l'autre, sur un même noyau de fer, une bobine inductrice A et une bobine induite B dont *les enroulements ont le même sens*, avec un rhéostat dans le circuit inducteur (fig. 3).

En faisant varier le courant inducteur, induisons un courant dans la bobine B et comparons les sens des courants inducteur et induit.

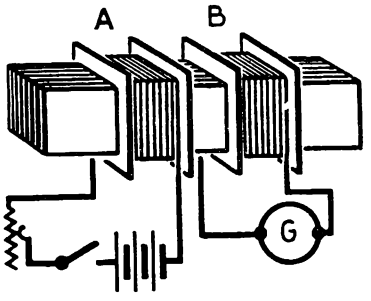


FIG. 3. — Montage pour comparer le sens du courant induit à celui du courant inducteur.

1° Le courant inducteur croît : *le courant induit est de sens contraire au courant inducteur.*

2° Le courant inducteur décroît : *le courant induit est de même sens que le courant inducteur.*

Considérons les flux produits par les deux courants :

1° dans la première expérience, le flux dû au courant inducteur croît, le flux dû au courant induit lui est opposé;

2° dans la seconde expérience, le flux résultant du courant inducteur décroît, le flux du courant induit est de même sens et s'ajoute au flux inducteur.

Donc le flux produit par le courant induit s'oppose dans les deux cas à la variation du flux inducteur.

C'est la **loi de Lenz** : *le courant induit est de sens tel que le flux qu'il produit s'oppose à la variation du flux inducteur.*

5. Quantité d'électricité induite.

En mesurant avec un *galvanomètre balistique* ou un *fluxmètre* la quantité d'électricité induite, on trouve qu'elle est :

1° *proportionnelle à la variation du flux* $\Delta\Phi$ (lire *delta phi*);

2° *inversement proportionnelle à la résistance R du circuit induit.*

Sa valeur est :

$$q = \frac{\Delta\Phi}{R}\cdot \qquad (1)$$

wébers / *coulombs ohms*

6. Force électromotrice induite.

a) La durée de variation du flux, qui est la durée du courant induit,

est t *secondes*. L'intensité moyenne du courant induit qui transporte q coulombs en t secondes est :

$$i = q : t = \frac{\Delta\Phi}{R.t}.$$

b) Puisque la résistance du circuit induit est R, la f. é. m. moyenne e produisant le courant i vaut :

$$e = R.i = \frac{\Delta\Phi}{t}.$$

Cette formule donnant la valeur de la f. é. m. induite

$$\boxed{e = \frac{\Delta\Phi}{t}} \quad \begin{matrix} \textit{wébers} \\ \textit{volts} \quad \textit{secondes} \end{matrix} \qquad (2)$$

est importante et doit être sue par cœur.

Remarque. Dans les formules (1) et (2), la variation de flux $\Delta\Phi$ est évaluée en *wébers*. Si elle était exprimée en *maxwells*, parce que 1 *wéber* vaut 100 millions de *maxwells*, le résultat devrait être divisé par 100 millions ou 10^8.

Application. *Le flux dans l'entrefer de l'électro-aimant employé dans nos expériences est* 6 000 maxwells. *La bobine induite compte* 100 *spires. La résistance du circuit induit comprenant le galvanomètre est* 20 ohms. *On sort la bobine de l'entrefer en* 0,03 seconde. *Calculer la quantité d'électricité induite et la f. é. m. obtenue.*

Le flux de 6 000 *maxwells* traverse les 100 spires de la bobine induite, tout se passe comme si la bobine n'avait qu'une spire et était traversée par

6 000 × 100 = 600 000 *maxwells*,

soit 0,006 *wéber*.

En appliquant les formules (1) et (2) :

q = 0,006 : 20)
= 0,000 03 *coulombs*,

e = 0,006 : 0,03)
= 0,2 *volts*.

7. Loi du flux coupé.

a) Imaginons une spire rectangulaire conductrice dont l'un des côtés AB puisse glisser sur les deux côtés voisins (fig. 4). Supposons

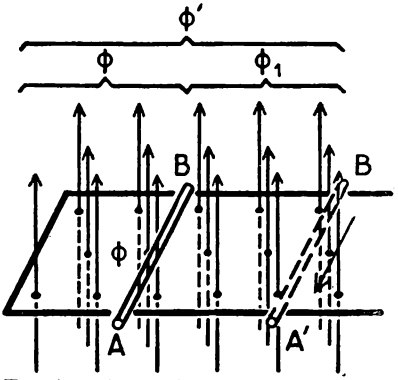


FIG. 4. — Quand le conducteur glisse de AB en A'B', la variation dans le circuit est égale au flux coupé dans le déplacement.

que cette spire soit placée dans un champ magnétique normalement aux lignes de force.

Quand le conducteur mobile est en AB, le flux dans la spire est Φ. Quand le conducteur s'est déplacé pour venir en A'B', le flux dans la spire est Φ'. La variation de flux est

$$\Phi_1 = \Phi' - \Phi.$$

Si la durée du mouvement du conducteur AB est ***t* secondes**, la f. é. m. induite a pour valeur :

$$e = \Phi_1 : t.$$

Or Φ_1 est le flux coupé, fauché par le conducteur AB pendant son déplacement; d'où la loi suivante dite du *flux coupé :* **quand un conducteur mobile coupe un flux Φ_1 wébers en t secondes, il se produit dans ce conducteur une f. é. m. induite égale à $\Phi_1 : t$ volts.**

Cette loi est d'un emploi commode pour l'étude des dynamos.

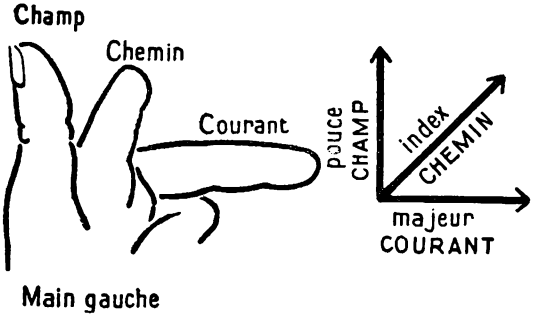


FIG. 5. — **Règle des trois doigts** de la main gauche.

b) Le sens du courant induit dans le conducteur AB s'obtient facilement en appliquant la règle des trois doigts : *le pouce, l'index et le majeur de la main gauche sont disposés comme les arêtes d'un cube aboutissant au même sommet* (fig. 5); *on place le* **pouce** *dans la direction et le sens du* CHAMP, *l'***index** *dans la direction et le sens du* CHEMIN *parcouru par le conducteur, le* **majeur** *indique le sens du* COURANT.

Main Gauche, parce qu'il s'agit d'un Générateur de courant,
pouce index majeur
(ordre naturel des doigts),
CHAMP CHEMIN COURANT
(ordre alphabétique).

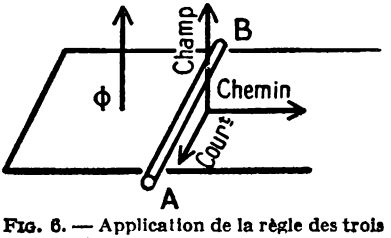


FIG. 6. — Application de la règle des trois doigts au cas de la figure 4.

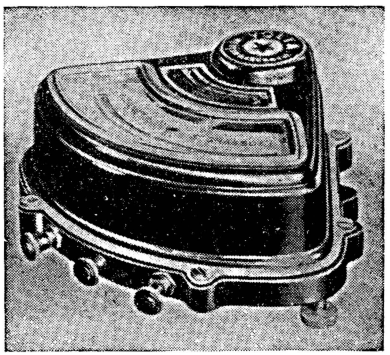
C. — Conclusions.

8. Importance de l'induction électromagnétique.

Il ne faut pas que la faible valeur de la quantité d'électricité et de la f. é. m. induites dans les expériences de cette leçon vous trompe sur l'importance du phénomène étudié.

Cette importance est énorme. C'est par induction que sont produits les courants intenses et les f. é. m. élevées que fournissent les génératrices électriques industrielles.

L'induction est le moyen employé pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour faire varier le flux dans le circuit induit d'une génératrice, on déplace l'un par rapport à l'autre un inducteur et un circuit induit. Ce mouvement relatif est effectué mécaniquement. On consomme, pour le réaliser, de l'énergie mécanique que l'on retrouve, moins quelques pertes, sous forme électrique dans le circuit de l'induit.



Cliché : Cie des Compteurs.

FIG. 7. — Vue d'un fluxmètre.

9. Principe d'une méthode de mesure des flux.

a) Pour mesurer un flux, on l'établit ou on le supprime dans une bobine. Une certaine quantité d'électricité est induite dans la bobine, quantité proportionnelle au flux. La mesure du flux est ainsi ramenée à celle d'une quantité d'électricité.

b) Pour mesurer une quantité d'électricité, on se sert souvent d'un *galvanomètre balistique.* C'est un galvanomètre analogue à celui de la figure 11, mais dimensionné pour que le cadre oscille lentement.

La quantité d'électricité à mesurer parcourt le cadre avant qu'il n'ait quitté sensiblement sa position de repos. Le cadre est lancé par une brève impulsion, l'élongation de sa première demi-oscillation est proportionnelle à la quantité d'électricité.

L'emploi d'un **fluxmètre** (fig. 7), galvanomètre sans rappel du cadre au zéro et qui n'oscille pas, est particulièrement commode.

10. Définition du wéber, unité de flux.

La définition résulte de la formule donnant la valeur de la f. é. m. induite dans un circuit :

$$e = \frac{\Delta\Phi}{t}.$$

Quand $e = 1$ *volt* et $t = 1$ *seconde*, $\Delta\Phi$ est égale à l'unité de flux. D'où la définition :

le wéber est le flux magnétique qui, traversant un circuit d'une seule spire, y produirait une f. é. m. de 1 volt *si on l'amenait à zéro en* 1 seconde *par décroissance uniforme.*

Rappelons que 1 *wéber* égale 100 000 000 *maxwells*, soit 10^8 *maxwells.*

RÉSUMÉ

1. — Un courant induit se produit dans un circuit fermé quand un flux magnétique varie dans ce circuit.

2. — Le courant induit dure autant que la variation du flux inducteur. Il est d'un sens tel que son flux propre s'oppose à la variation du flux inducteur (loi de Lenz).

La quantité d'électricité induite est :

$$q = \Delta\Phi : R$$

***q* est obtenue en *coulombs* quand $\Delta\Phi$, la variation du flux, est évaluée en *wébers* et R, la résistance du circuit induit, en *ohms*.**

La force électromotrice induite a pour valeur :

$$e = \Delta\Phi : t.$$

***e* est en *volts* et *t*, la durée de variation du flux, en *secondes*.**

3. — Quand un conducteur mobile fauche un flux Φ_1 wébers en *t secondes*, la f. é. m. induite est, en *volts* :

$$e = \Phi_1 : t.$$

EXERCICES

1. Quand on enfonce l'aimant NS dans la bobine A (fig. 8), il se produit dans cette bobine un courant induit. Déterminer le sens de ce courant dans la partie *ab* du circuit.

2. Deux bobines identiques A et B sont placées l'une à côté de l'autre, elles ont même axe; les deux extrémités de A sont réunies et la bobine constitue un circuit fermé; un courant continu constant passe dans la bobine B.

1° Ce courant produit-il un courant induit dans la bobine A? Justifier la réponse.

2° On introduit un noyau de fer doux dans les deux bobines (fig. 9). Que se produit-il dans la bobine A ? Pourquoi ?

3° On retire brusquement le noyau des deux bobines. Que se passe-t-il dans la bobine A ?

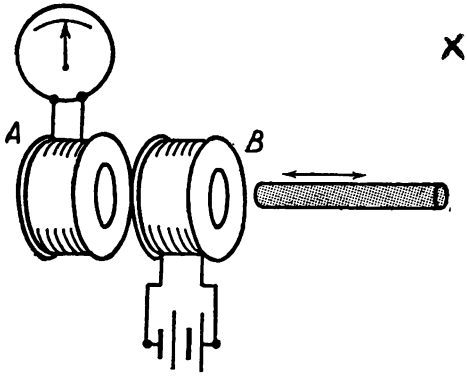


FIG. 9. — Figure pour l'exercice 2.

✗ *3.* Le flux sortant d'un pôle d'aimant est 3 000 *maxwells*. On introduit ce pôle dans une bobine de 100 spires faisant partie d'un circuit fermé dont la résistance est 30 *ohms*. Le déplacement de l'aimant est effectué en 0,05 *seconde*. Calculer la quantité d'électricité et la f. é. m. induites.

Réponses : 0,000 1 *coulomb* — 0,06 *volt.*

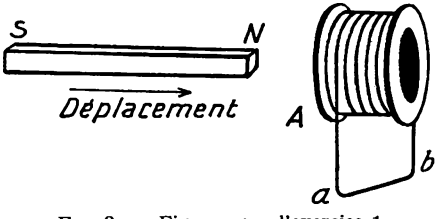


FIG. 8. — Figure pour l'exercice 1.

✗ *4.* Un conducteur rectiligne long de 30 *cm* fauche, à la vitesse de 18 *mètres par seconde*, le flux constant qui existe dans l'entrefer d'un gros électro-aimant. Calculer la f. é. m. induite dans le conducteur sachant que l'induction est 0,6 *tesla* en tous les points de l'entrefer.

Réponse : 3,24 *volts.*

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

1. ***Électro-aimant*** (fig. 10). — *Circuit magnétique.* — Deux noyaux carrés de 25 × 25 × 77 *mm*, dont les axes sont distants de 76 *mm* sont fixés par deux vis de 8 et deux goupilles de positionnement sur une culasse de 130 × 54 × 13 *mm* avec deux oreilles de fixation sur une semelle de bois. Les pièces polaires de section 25 × 25 *mm* et de longueur 44 *mm* portent un talon et sont serrées sur les noyaux par une vis de 6 × 33 *mm;* elles laissent entre elles un entrefer de 20 *mm*. Une armature de 25 × 25 × 101 *mm* peut les remplacer. Les joints sont soigneusement dressés.

Bobines. — Les carcasses sont en zinc ou en laiton de 10/10, isolées par du presspahn. Elles sont fendues d'un trait de scie sur toute leur hauteur y compris les joues. La hauteur extérieure mesure 66 *mm;* l'ouverture pour le passage du noyau 26 × 26 *mm;* les joues, 54 × 54 *mm.*

Sur chaque bobine sont enroulées 8 couches de chacune 40 spires de fil de cuivre de 12/10, isolé coton, soit environ 500 *g* de fil par bobine.

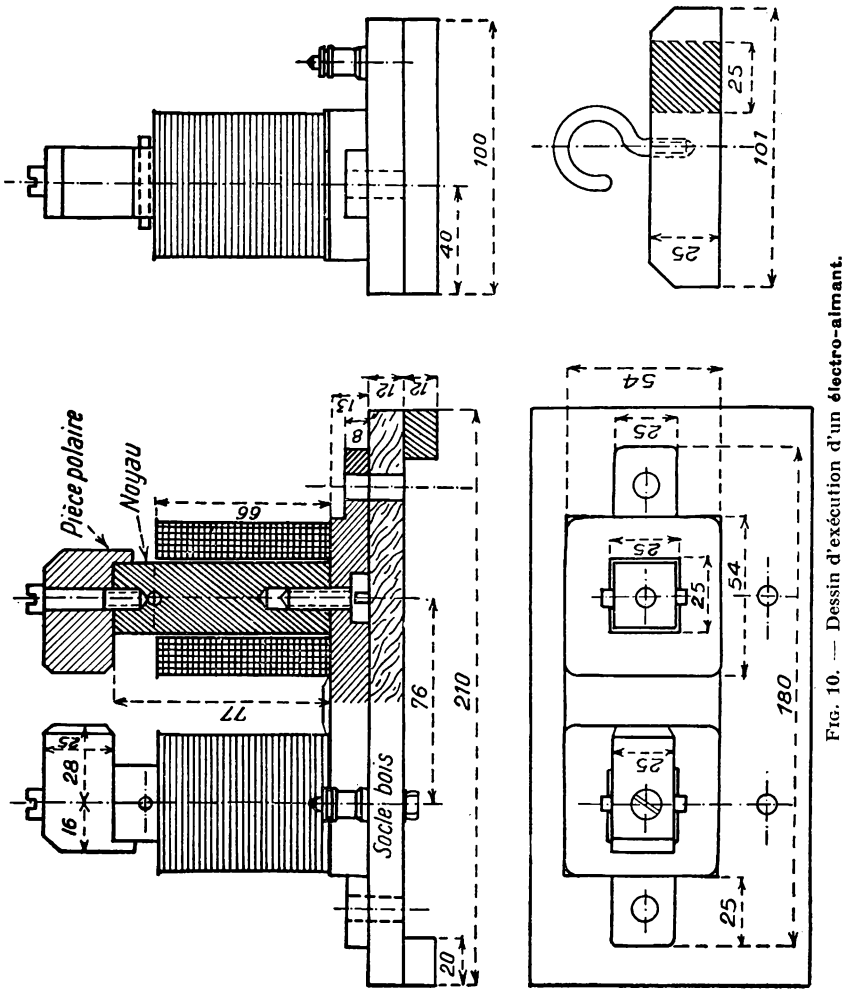


FIG. 10. — Dessin d'exécution d'un électro-aimant.

Fonctionnement. — Les deux bobines en série ont une résistance de 1,5 Ω. L'électro-aimant peut être alimenté sans rhéostat par une batterie de 3 éléments d'accumulateurs. Le flux dans l'entrefer est environ 6 000 *maxwells*.

2. Galvanomètre à cadre mobile (fig. 11). — L'aimant est fait de trois lames d'acier de 20 × 8 × 320 *mm* pliées sur champ en fer à cheval ouvert de 50 *mm* et rivées ensemble [1]. Le cadre compte une centaine de tours de fil de cuivre de 2/10 isolé à la soie, il mesure 70 × 40 × 10 *mm*. Le support, en bois dur, est une tige de 750 × 30 × 20 *mm*. Aux extrémités de la tige sont fixées deux lames de cuivre un peu élastiques de 60 × 15 × 1 *mm* sur les bords desquelles sont soudées les extrémités libres du fil du cadre mobile et deux fils plus gros aboutissant à deux bornes sur la planchette. Le cadre est parallèle aux lignes de force entre les pôles de l'aimant.

Pour que sa déviation soit très visible, le cadre porte un petit miroir ou un index très léger, brin de paille ou fil d'aluminium (200 *mm*).

L'appareil indique le passage d'un courant de l'ordre de 0,000 1 *ampère* [2].

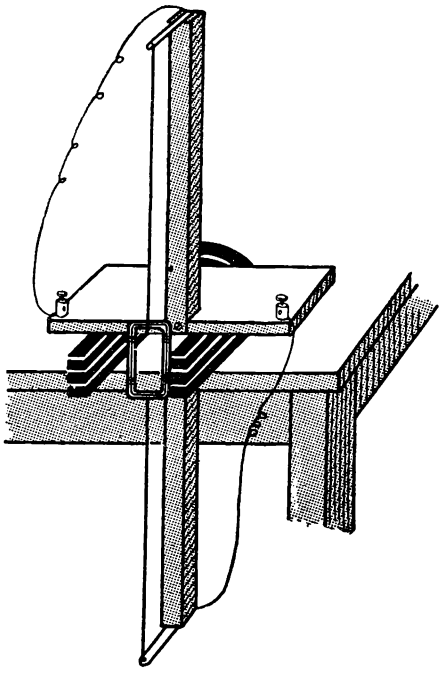


FIG. 11.
Galvanomètre simplifié à cadre mobile.

3. Induction par le courant alternatif du secteur (fig. 2). — Le noyau fait de tôles empilées a 40 × 40 × 260 *mm*. La bobine inductrice compte 360 spires, elle est alimentée par le secteur à 110 *volts* avec un rhéostat de 50 *ohms* en série. La bobine induite porte 90 spires. On peut utiliser la traverse et deux bobines du transformateur démontable de la 40e leçon.

1. Ces lames peuvent être forgées avec de l'acier au tungstène et trempées dans l'huile. Il est plus simple d'acheter l'aimant, par exemple à la Maison Carpentier.
2. D'après ABRAHAM, *Recueil d'expériences de physique.*

Courants de Foucault. Induction propre.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un électro-aimant muni de ses pièces polaires (23e *leçon*).
Un rhéostat d'une dizaine d'ohms.
Une batterie d'accumulateurs de trois éléments.
Deux pièces de transformateur triphasé démontable, savoir
1 *bobine de* 360 *spires,*
1 *traverse.*
Une lime grosse taille.
Une lampe à incandescence 40 watts, 110 volts.
Une dynamo shunt, 2 kW, 110 volts.
Un interrupteur.
Une carcasse de transformateur monophasé démontable.
Un ampèremètre électromagnétique de 5 ampères.

LEÇON

A. — Courants de Foucault.

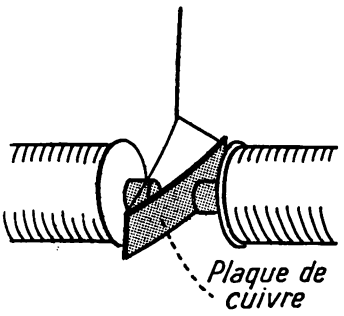


FIG. 1. — Quand l'électro n'est pas excité, le pendule oscille longtemps; quand l'électro est aimanté, le pendule s'arrête très vite.

1. Expériences.

Appareil. — Un pendule, consistant en une plaque épaisse (4 *mm*) de laiton oscille entre les pôles d'un électro-aimant dont un rhéostat permet de faire varier l'aimantation (fig. 1).

Expériences. — a) *L'électro-aimant n'est pas excité.* Le pendule oscille longtemps avant de s'arrêter.

b) *L'électro-aimant est aimanté fortement.* Le pendule est freiné et s'arrête après un tout petit nombre d'oscillations.

c) *L'électro-aimant est peu aimanté.* Le freinage est encore nettement visible, mais il est moins intense et le pendule effectue un plus grand nombre d'oscillations avant de s'arrêter.

Conclusion. — Vous ne pouvez pas supposer que les pôles de l'électro-aimant attirent le pendule quand il passe entre eux et ralentissent ainsi son mouvement puisque le laiton n'est pas magnétique.

C'est le flux existant dans l'entrefer qui, par induction, freine le pendule.

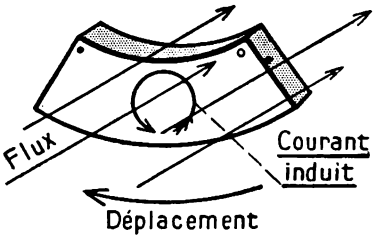


FIG. 2. — Production de **courants de Foucault** dans la masse du pendule. La flèche en cercle indique le trajet d'un courant.

2. Des courants s'induisent dans la masse de laiton en mouvement dans l'entrefer.

La plaque de laiton est un conducteur qui, en se déplaçant, coupe le flux entre les pièces polaires. Donc des courants s'induisent dans ce conducteur. Leur trajet dans le métal n'est pas bien défini, *ils circulent dans des plans perpendiculaires aux lignes de force du flux* et se ferment dans la masse du laiton (fig. 2).

Parce que le laiton est bon conducteur et qu'il offre une large section au passage des courants, ces courants induits sont intenses. Ils dissipent de l'énergie en chaleur Joule. Cette énergie provient du pendule en mouvement qui bientôt s'arrête.

A ces courants induits dans des masses métalliques soumises à des variations de flux, on donne le nom de **courants de Foucault** [1].

3. Les courants de Foucault sont nuisibles dans les machines électriques.

Dans beaucoup de machines électriques, des masses importantes d'acier sont soumises à un flux variable. En voici deux exemples.

1° Dans les *dynamos et les moteurs à courant continu*, la carcasse de la partie mobile que l'on nomme *induit* est un volumineux cylindre d'acier qui tourne entre les pôles d'un gros électro-aimant.

En examinant la figure 3, vous voyez que le sens du flux d'induction dans ce cylindre change deux fois par tour. Quand l'induit fait par exemple 20 tours par seconde, il est soumis chaque seconde à 20 cycles d'aimantation.

1. *Foucault*, physicien français (1818-1868).

2° La figure 4 représente la carcasse en acier d'un *transformateur monophasé*, machine à courant alternatif qui fonctionne sans qu'aucun de ses organes soit mobile. Sur chaque colonne, des bobines sont parcourues par des courants alternatifs à 50 périodes par seconde. La carcasse d'acier est donc soumise, par seconde, à 50 cycles d'aimantation.

Le flux variable induit, dans l'acier, des courants de Foucault. De l'énergie est perdue, dissipée inutilement en chaleur. De plus, les courants de Foucault augmentent l'échauffement des machines et vous savez que cet échauffement limite la puissance que l'on peut leur demander.

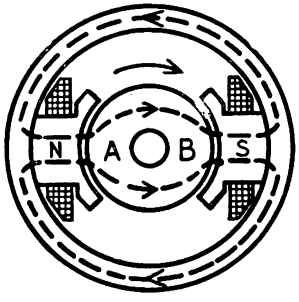


FIG. 3. — Schéma de l'**induit** et de l'**inducteur** d'une dynamo bipolaire. L'inducteur produit un flux fixe qui traverse l'induit dans le sens NS. Dans la figure, le flux va du point A vers le point B. Quand l'induit aura tourné d'un demi-tour, les points A et B auront permuté et le flux traversera l'induit de B vers A. Donc *l'induit est soumis à un cycle d'aimantation par tour.*

4. On réduit les courants de Foucault en feuilletant les masses métalliques soumises à un flux variable.

a) Par exemple :

1° la carcasse de l'induit des dynamos, au lieu d'être massive, est faite de disques de tôles empilées; chaque feuille de tôle est séparée de ses voisines par une feuille de papier ou une couche de vernis;

2° de même la carcasse des transformateurs est fabriquée en serrant l'une contre l'autre des bandes de tôles isolées au papier.

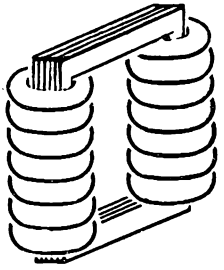


FIG. 4. — Dessin simplifié d'un **transformateur monophasé.** Les bobines établissent un flux alternatif dans la carcasse.

Ce feuilletage, parce qu'il est disposé dans le plan des lignes d'induction, ne gêne pas le passage du flux, mais il diminue les courants de Foucault dont l'isolant entre tôles limite le trajet à une fraction de millimètre.

Plus les tôles sont minces, plus les pertes par courants de Foucault sont réduites.

b) On diminue aussi l'intensité des courants de Foucault en employant des tôles dont la résistance électrique est grande. Certaines ont une résistivité qui atteint 4 ou 5 fois celle du fer ordinaire.

5. Caractéristiques des tôles pour construction électrique.

Vous savez que l'aimantation alternative du fer y produit aussi des pertes par hystérésis.

On indique, pour les diverses tôles électriques, leurs **pertes magnétiques totales,** comprenant à la fois pertes par hystérésis et pertes par courants de Foucault, en *watts par kilogramme*, quand elles sont soumises à une aimantation variant de + 1 *tesla* à — 1 *tesla* à la fréquence de 50 cycles par seconde.

Ces pertes varient entre 6,8 *watts par kilogramme*, pour des tôles électriques de qualité ordinaire épaisses de 0,5 *millimètre*, et 1,20 *watt par kilogramme*, pour des tôles au silicium de haute qualité épaisses de 0,35 *millimètre*.

B. — Autoinduction.

6. Expériences.

Une batterie d'accumulateurs de trois éléments alimente une bobine de 360 spires. Une extrémité du fil du circuit est reliée à une lime grosse taille (fig. 5).

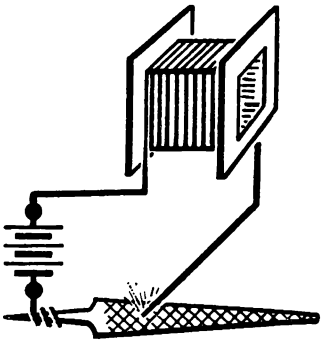


FIG. 5. — La bobine n'a pas de noyau. Les étincelles sont peu nombreuses sur la lime.

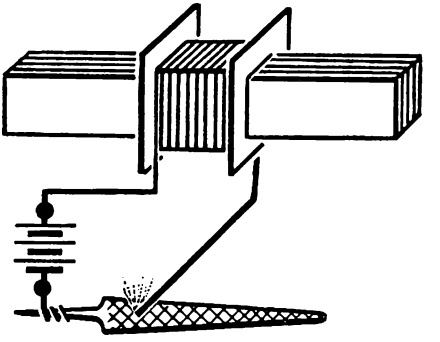


FIG. 6. — La bobine entoure un **gros noyau de fer** : les étincelles obtenues sont longues et brillantes.

a) Frottons l'autre extrémité du fil sur la lime. Quand elle passe d'une dent à l'autre, le courant est coupé et il se produit une petite étincelle à la rupture.

b) Mettons dans la bobine un gros noyau de fer. Les étincelles deviennent longues et brillantes (fig. 6), comme si nous coupions une tension bien plus élevée que celle fournie par la batterie.

7. La formation d'étincelles longues et nourries résulte de la suppression du flux important qui traverse la bobine.

a) Le courant dans le circuit produit un flux dans la bobine. Ce flux est grand à cause de la présence du noyau de fer.

b) Quand on coupe le courant, le flux dans la bobine est brusquement supprimé. Cette variation de flux induit une f. é. m. dans le circuit. La variation est importante et très brève, il en résulte une f. é. m. induite qui peut être très supérieure à celle de la batterie. C'est elle qui produit les étincelles au point de coupure du circuit.

c) A ce phénomène d'induction, dû à un courant dans son propre circuit, on donne le nom d'**induction propre,** d'**autoinduction** ou de **self-induction.**

8. La self-induction joue un rôle lors de la fermeture ou de l'ouverture d'un circuit à courant continu.

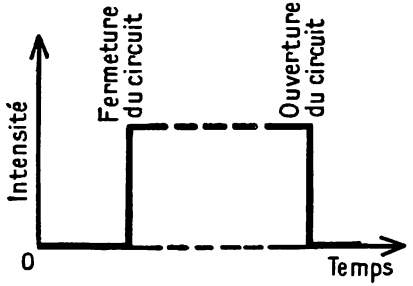


FIG. 7. — Courbe des variations de l'intensité d'un courant à la fermeture et à l'ouverture d'un circuit non inductif.

a) ***Cas d'un circuit sans bobine.*** — Un tel circuit, dans lequel un courant ne produit qu'un flux négligeable, est dit sans self-induction ou *non inductif.*

La courbe de l'intensité du courant lors de son établissement et de sa suppression est donnée par la figure 7, compréhensible sans explications.

b) ***Cas d'un circuit inductif.*** — Un circuit est *inductif* quand il contient une bobine, surtout avec un noyau de fer.

1° Quand on ferme le courant, un flux s'établit dans la bobine. Cette

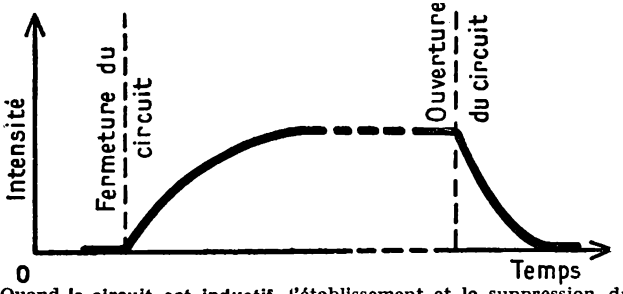


FIG. 8. — Quand le circuit est inductif, l'établissement et la suppression du courant ne sont pas instantanés.

création de flux induit un courant de sens opposé au courant dont il ralentit la croissance.

2° Quand on coupe le circuit, le flux dans la bobine disparaît. Cette variation de flux produit une f. é. m. qui s'oppose à la suppression du courant et prolonge la durée de la coupure par une étincelle (fig. 8).

c) ***Voici une expérience qui montre la self-induction à la fermeture et à l'ouverture d'un circuit.***

Comme circuit inductif, nous employons l'enroulement inducteur d'une dynamo shunt à 110 *volts*. Cet inducteur est un gros électro-aimant qui possède un grand nombre de spires.

Une lampe à incandescence à 110 *volts* est mise en dérivation à ses bornes. L'ensemble est alimenté par du courant continu à 110 *volts*. Un rhéostat de quelques ohms sert à régler le courant pour que le filament de la lampe soit seulement rouge. Un interrupteur commande le circuit (fig. 9).

Coupons le courant : l'ampoule brille d'un vif éclat pendant un instant. C'est la f. é. m. de self-induction dans la bobine inductive qui en est la cause.

Rétablissons le courant : la lampe brille pendant une fraction de seconde. La self-induction retarde l'établissement du courant dans la bobine et il passe plus intense dans l'ampoule.

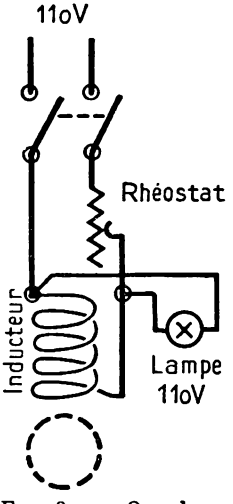


FIG. 9. — Quand on supprime ou établit le courant, la lampe brille un instant.

9. La self-induction a peu d'importance pratique en courant continu.

Faisons exception pour les *circuits inducteurs* des dynamos, des moteurs à courant continu, des alternateurs. Ces circuits, composés de plusieurs bobines à noyaux de fer, à grand nombre de spires et montées en série, sont très inductifs. Quand on y coupe un courant, la f. é. m. de self-induction y est si élevée qu'elle produit parfois une étincelle entre spires et « claque » l'inducteur.

On évite cet accident dans les moteurs à courant continu en maintenant toujours fermé le circuit inducteur sur le rhéostat de démarrage et l'induit. La self-induction y prolonge le courant sans produire d'étincelles, puisqu'il n'y a pas de coupure (fig. 10).

Dans d'autres cas, l'interrupteur de courant est muni d'un talon;

c'est une lame qui ferme le circuit sur lui-même au moment de la suppression du courant (fig. 11).

Pour obtenir une bobine sans self-induction, on plie le conducteur

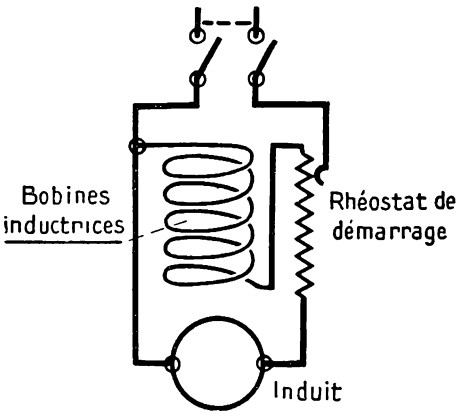


FIG. 10. — La f. é. m. de self dans les **inducteurs d'un moteur** à courant continu ne produit pas d'étincelles parce que la partie inductive du circuit est fermée sur elle-même.

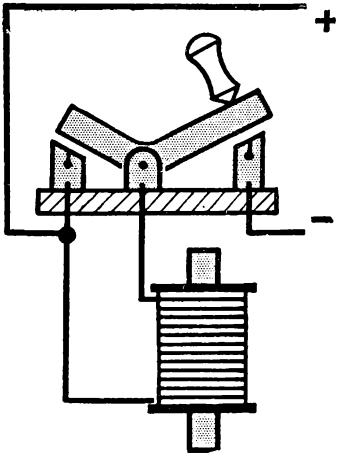


FIG. 11. — Schéma d'un **interrupteur à talon.**

au milieu de sa longueur et l'on enroule le fil double sur la carcasse de la bobine (fig. 12). Le courant est de sens contraire dans deux spires voisines, le champ créé par l'une d'elles est détruit par l'autre qui produit un champ opposé.

FIG. 12. — Enroulement d'une bobine pour qu'elle n'ait pas de self-induction. En réalité, les spires sont serrées les unes contre les autres.

10. La self-induction dans les circuits à courant alternatif.

Enfilons une bobine de 360 spires sur un noyau de fer fermé sur lui-même, en l'espèce la carcasse d'un petit transformateur démontable (fig. 13). Nous obtenons une bobine *très inductive.*

La résistance ohmique est environ 1,5 *ohm.* Si nous mettions à ses bornes une *tension continue* de 115 *volts,* l'intensité du *courant continu* atteindrait la valeur excessive de 115 : 1,5 ≈ 76 *ampères.*

Plaçons la bobine sur la prise de courant du *secteur alternatif* qui fournit aussi une tension de 115 *volts.* L'intensité du courant est à peine 2 *ampères.*

Ce comportement différent de la bobine sous une tension continue ou sous une tension alternative s'explique par la self-induction. Le courant alternatif, dont l'intensité et le sens changent constamment, crée dans la bobine un flux qui varie constamment de grandeur et de sens. Il en résulte qu'une f. é. m. de self-induction, s'opposant aux variations du courant, est constamment induite dans la bobine. Cette f. é. m. atteint 112 *volts* et limite le courant à 2 *ampères*.

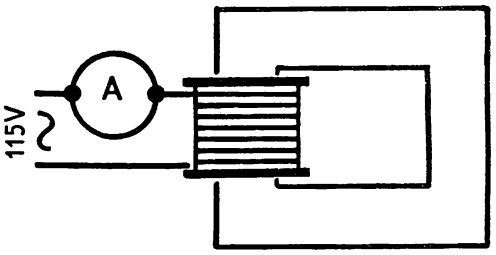


FIG. 13. — **Bobine de self-induction** dans un circuit à courant alternatif. Elle ne laisse passer qu'un faible courant bien qu'elle soit peu résistante.

Une telle bobine se nomme **bobine de self-induction.** Elle sert quelquefois, au lieu de résistance ou de rhéostat, à limiter le courant alternatif dans un circuit à courant alternatif.

RÉSUMÉ

1. — Dans la plupart des machines électriques, des masses d'acier sont soumises à un flux variable. Des courants s'induisent à l'intérieur du métal : on les nomme *courants de Foucault.*

2. — Les courants de Foucault font perdre de l'énergie qu'ils dissipent en chaleur. L'échauffement qui en résulte est nuisible.

3. — On atténue les courants de Foucault en fabriquant certains organes des machines en tôles empilées. Les tôles sont parallèles aux lignes d'induction.

4. — On donne le nom de *self-induction* à la production de f. é. m. induite par un courant variable dans son propre circuit. Cette f. é. m. est parfois très élevée.

La self-induction joue un rôle important dans les circuits à courant alternatif.

EXERCICES

1. Imaginer le schéma d'un allumoir électrique à self-induction.

2. La f. é. m. de self dans un circuit inductif est plus grande à l'ouverture du circuit qu'à la fermeture. Pourquoi ?

3. Est-il possible de fabriquer une *bobine magnétisante* sans self-induction, du type de la figure 12 ?

4. Dans l'expérience de la figure 13, on suppose que l'induction dans le noyau est $\mathfrak{B} = 0{,}5$ *tesla*. La section de ce noyau est 40×40 *mm*. La bobine compte 360 spires. Quelle est la valeur de la f. é. m. de self quand on coupe le courant en 0,01 seconde?

Réponse : 72 *volts.*

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

Appareil à courants de Foucault (fig. 14). — Le support, en bois dur, mesure 420 *mm* sous traverse et 250 *mm* entre montants. Sur la semelle large de 120 *mm*, on pose l'électro-aimant. La masse oscillante est un arc de couronne découpé dans une plaque de laiton de 4 *mm* avec des rayons de 270 et 300 *mm*. Cet arc est long de 150 *mm*. Deux fines ficelles le suspendent dans l'entrefer de l'électro-aimant, soit à 126 *mm* de la semelle.

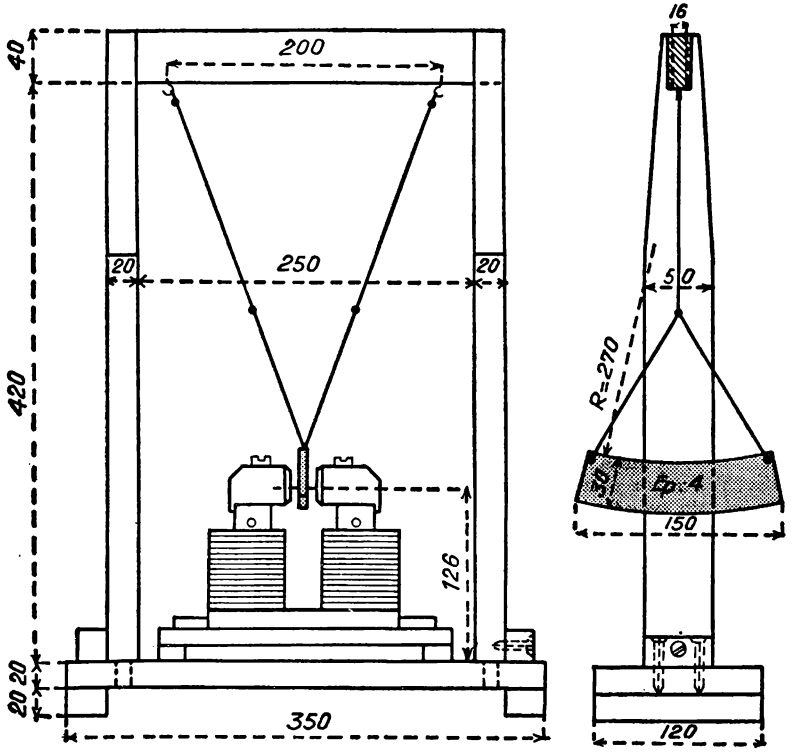


FIG. 14. — Dessin d'exécution d'un **pendule à courants de Foucault.**

6. DYNAMOS GÉNÉRATRICES

25e LEÇON

Dynamo bipolaire à excitation indépendante.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une dynamo shunt, 115 volts, *d'environ* 2 000 watts.
Un moteur à courant continu de 2 *ou* 3 chevaux, *avec rhéostat de démarrage et rhéostat de champ.*
Un compte-tours avec 1 *montre à secondes ou* 1 *tachymètre.*
Un voltmètre à cadre mobile à plusieurs sensibilités.
Un ampèremètre calibre 2 ampères.
Un ampèremètre calibre 20 ampères.
Un rhéostat de lampes, 115 volts, 2 000 watts.
Un rhéostat de champ.
Deux interrupteurs bipolaires.

LEÇON

Les dynamos génératrices, en utilisant l'induction, transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique obtenue sous forme de courant continu.

A. — Description d'une dynamo.

Nous avons, ensemble, démonté et remonté une dynamo pour apprendre comment elle est constituée : résumons nos constatations.

La machine comprend un **inducteur**, un **induit**, un **collecteur** et des **balais**.

1. L'inducteur est un gros électro-aimant : il est fixe.

L'**inducteur** (fig. 1) est un gros **électro-aimant** à deux, quatre, six... pôles. Nous avons choisi comme type, pour simplifier notre étude, une petite dynamo de 1 800 *watts* n'ayant que deux pôles, c'est-à-dire *bipolaire*. Toute la masse des pôles est feuilletée, mais, dans les grosses machines, le feuilletage est limité aux pièces polaires.

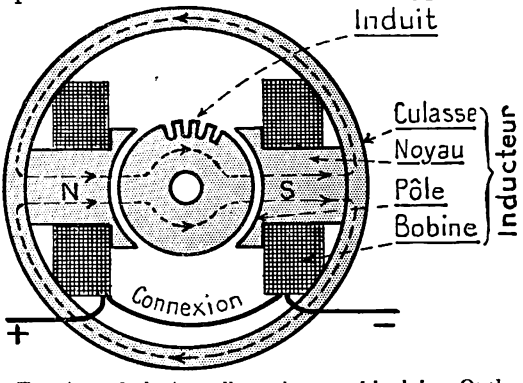


FIG. 1. — **Inducteur d'une dynamo bipolaire.** Quelques encoches seulement sont représentées sur le tambour de l'induit.

Les deux noyaux sont réunis par un anneau, ou cylindre creux épais en acier coulé, qui sert de *culasse* à l'électro-aimant.

Une *bobine magnétisante* est enfilée sur chaque noyau et les bobines sont couplées en série.

Le flux produit dans les noyaux, sortant des pièces polaires, après avoir traversé l'entrefer, pénètre dans l'induit.

2. L'induit est fait d'une carcasse et d'un enroulement : il est mobile.

La *carcasse* est un cylindre nommé *tambour*, constitué de disques de tôle empilés, clavetés sur l'arbre de la machine. Le tambour est creusé sur sa surface extérieure d'*encoches* ou *rainures* laissant des *dents* entre elles.

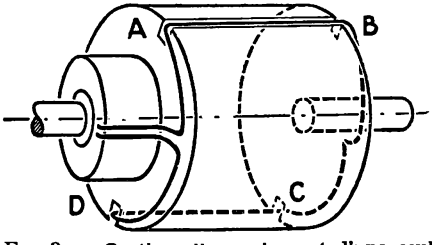


FIG. 2. — **Section d'enroulement** d'une seule spire de dynamo bipolaire.

Dans les rainures est logé l'*enroulement* de l'induit (fig. 2). Un conducteur AB passe dans une rainure, se continue sur la base du tambour suivant BC, puis dans la rainure CD presque diamétralement opposée à AB, à nouveau et plusieurs fois dans AB et CD, formant ainsi une *section de l'enroulement*. Les conducteurs sont isolés les uns des autres et surtout de la carcasse de l'induit. Le fil de sortie d'une section et

le fil d'entrée de la section suivante sont réunis ensemble et soudés tous les deux à la *même* lame du collecteur.

3. Le collecteur tourne avec l'induit.

Le *collecteur* est claveté sur l'arbre de l'induit.

Il se compose de lames de cuivre, dont la section est un trapèze, portant chacune une ailette de connexion à l'enroulement de l'induit;

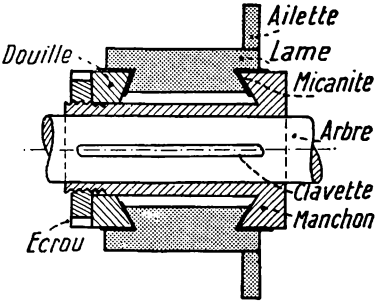


FIG. 3. — Coupe d'un **collecteur.**

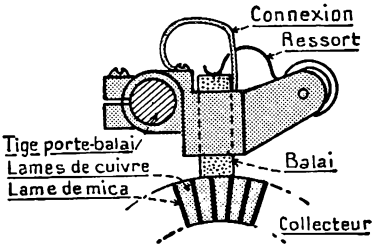


FIG. 4. — Un **balai** dans sa cage. Un ressort l'appuie sur le collecteur.

ces lames sont isolées, par du mica, les unes des autres et de l'arbre de la machine (fig. 3).

4. Les balais sont fixes.

Les deux *balais*, en charbon graphitique, appuient sur des lames diamétralement opposées du collecteur. Ils sont immobiles, isolés électriquement du bâti de la machine; ce sont les prises du courant que produit l'induit (fig. 4).

Quand la dynamo est construite pour débiter un courant intense, au lieu de deux balais, elle en porte deux lignes.

Les machines **multipolaires,** c'est-à-dire à plusieurs paires de pôles, ont parfois deux lignes de balais; elles en ont quelquefois autant que de pôles.

Les quelques renseignements numériques qui suivent précisent la description précédente de la petite dynamo choisie comme exemple :

chaque bobine de l'inducteur est faite de 2 500 spires, la résistance des deux bobines en série est 140 *ohms;*

la surface d'une pièce polaire est 123 *centimètres carrés,* le flux qui en sort est environ 0,007 *wéber*;

les 28 rainures du tambour d'induit contiennent chacune 24 conducteurs, l'induit a donc au total $24 \times 28 = 672$ conducteurs;

le collecteur est fait de 56 lames.

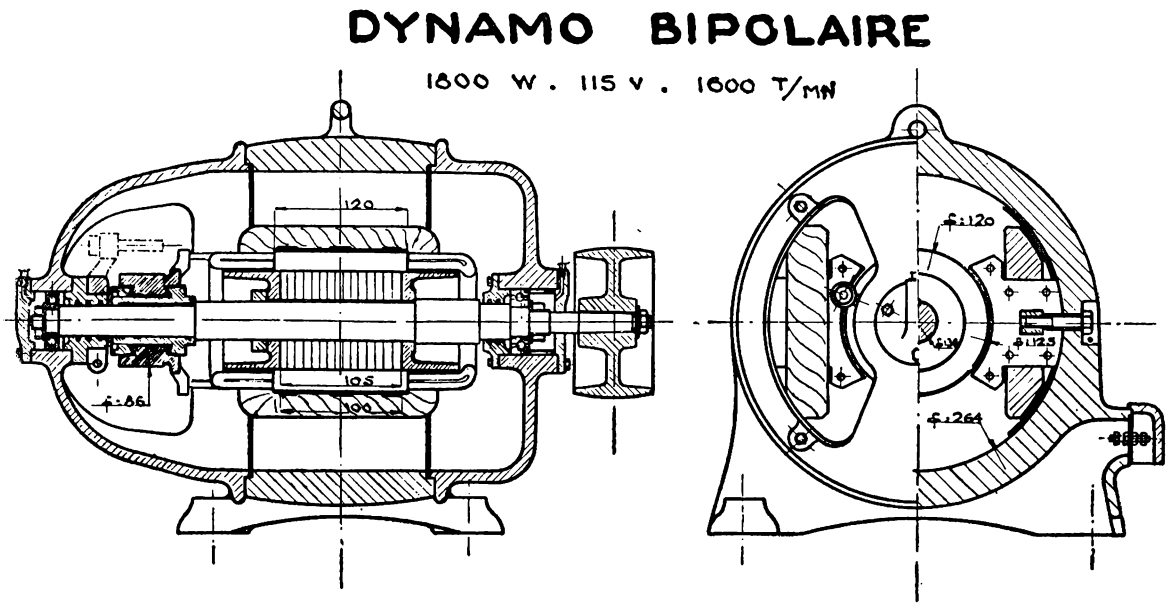


FIG. 5. — A gauche, **vue de face** de la dynamo coupée. A droite, **vue de gauche** avec demi-coupe.

REMARQUEZ : les *bobines inductrices ;* l'*induit* claveté sur l'arbre; le *collecteur ;* la *couronne porte-balais ;* le *bâti* comportant la *culasse* de l'inducteur et deux *flasques* fixés sur la culasse dans lesquels sont montés les deux *roulements à billes* de l'induit.

Remarques. — 1. Puisque toutes les sections de l'enroulement sont réunies en série par leur soudure aux lames du collecteur, *l'induit est fermé sur lui-même.*

2. On représente schématiquement une dynamo par l'un des symboles de la figure 6.

3. Les deux extrémités de l'enroulement inducteur et les deux balais de la dynamo sont réunis à quatre bornes placées sur la carcasse de la machine. La figure 7 représente l'aspect habituel d'une telle plaque.

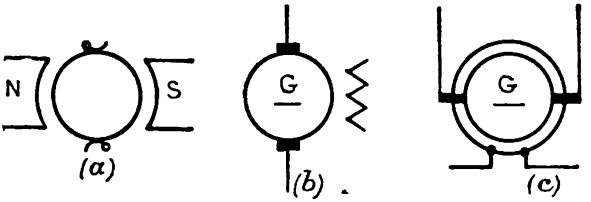


FIG. 6. — On représente une dynamo par l'un de ces symboles. Les symboles *b* et *c* sont normalisés.

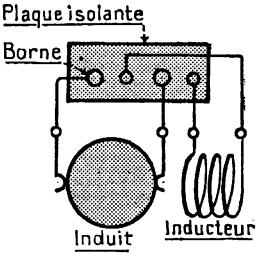


FIG. 7.— **Plaque de bornes** d'une dynamo. Les connexions sont faites par le constructeur à l'intérieur de la machine.

B. — Dynamo à excitation indépendante à vide.

5. Faisons fonctionner la dynamo sans lui faire débiter de courant.

Montage. — Entraînons la dynamo par un moteur dont nous pouvons faire varier la vitesse, un moteur électrique à courant continu par exemple.

Le circuit inducteur, dans lequel sont en série un rhéostat et un ampèremètre, est alimenté avec du courant continu fourni soit par le secteur, soit par une autre dynamo ou une batterie d'accumulateurs. La dynamo étudiée est dite montée à *excitation séparée* ou *indépendante.*

Un voltmètre polarisé

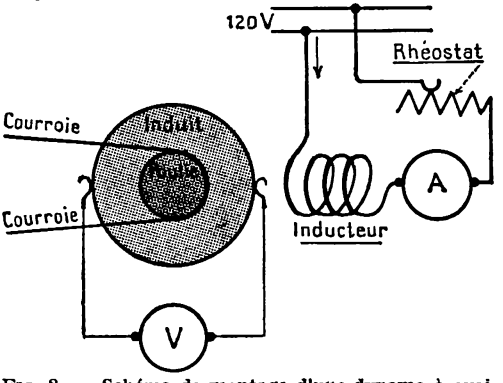


FIG. 8. — **Schéma de montage d'une dynamo à excitation indépendante à vide.**

est branché aux bornes de l'induit pour en indiquer la polarité et mesurer la tension (fig. 8).

Expériences. — 1° Faisons tourner la dynamo : *le voltmètre indique une f. é. m.*, par exemple 115 *volts*, et *d'un certain sens.*

2° Changeons le sens de rotation de la machine : *la f. é. m. change aussi de sens.*

3° Faisons varier la vitesse de rotation de la dynamo : *la f. é. m. croît quand l'induit tourne plus vite, elle diminue quand il ralentit.*

Mesurons quelques vitesses et les f. é. m. correspondantes, nous trouvons par exemple :

pour 1 600 *t/mn*, E = 115 V,
pour 1 800 *t/mn*, E = 130 V,
pour 2 000 *t/mn*, E = 142 V.

Les rapports de la f. é. m. à la vitesse ont la même valeur :

$$\frac{115}{1\,600} = \frac{130}{1\,800} = \frac{142}{2\,000}.$$

4° Inversons le sens du courant dans l'inducteur : *la f. é. m. de la machine change de sens.*

5° Faisons varier l'intensité du courant inducteur : *la f. é. m. croît ou décroît en même temps que l'intensité d'excitation.*

Conclusions. — *Quand un courant passe dans l'inducteur de la dynamo et que l'induit tourne :*

a) *une f. é. m. se produit aux bornes de l'induit;*

b) *cette f. é. m. change de sens si le sens de rotation de l'induit ou le sens du courant inducteur sont inversés;*

c) *la f. é. m. croît ou décroît avec le courant inducteur, elle est proportionnelle à la vitesse de l'induit.*

6. Caractéristique à vide d'une dynamo.

En laissant la vitesse de l'induit invariable, faisons croître l'intensité i dans l'inducteur et mesurons, pour diverses valeurs de i, la f. é. m. E de la dynamo.

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau ci-dessous.

EXCITATION *i ampères*	F. é. m. *E volts*
0	2
0,20	60
0,30	82
0,50	109
0,60	117
0,75	125
0,85	130
1,0	134

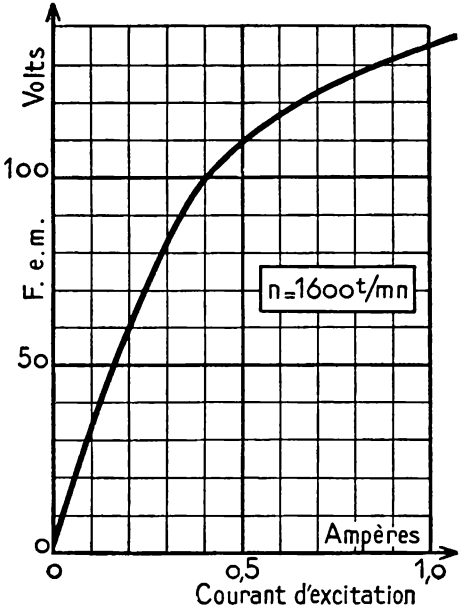


FIG. 9. — **Caractéristique à vide.**

Traçons la courbe de E en fonction de i. Elle est représentée figure 9. C'est *la caractéristique à vide* de la dynamo.

Vous remarquez qu'elle ressemble à une courbe d'aimantation d'acier, avec toutefois un coude moins marqué. C'est en effet la courbe d'aimantation de la machine, l'influence des entrefers la redresse par rapport à la courbe d'un acier.

Elle renseigne sur la constitution magnétique de la dynamo.

C. — Dynamo à excitation indépendante en charge.

7. La tension baisse aux bornes de la dynamo qui fournit du courant.

Montage. — Nous ins-

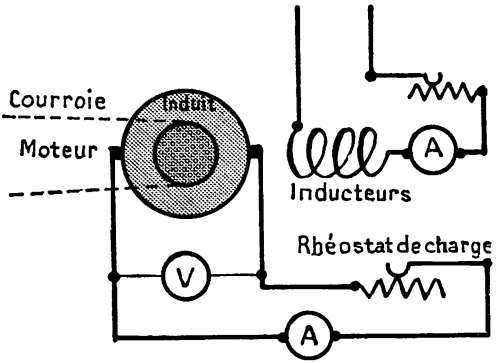


FIG. 10. — **Schéma de montage** d'une dynamo à excitation indépendante **en charge.**

tallons un rhéostat de lampes (rhéostat de charge) avec un ampèremètre et un voltmètre aux bornes de la dynamo (fig. 10).

Mesures. — Sans modifier ni la vitesse de l'induit, ni l'intensité du courant dans l'inducteur, nous faisons débiter à la machine des courants croissants dans le rhéostat de lampes, en mesurant le courant fourni I et la tension U correspondante aux bornes de la dynamo. Le tableau qui suit rassemble les résultats obtenus.

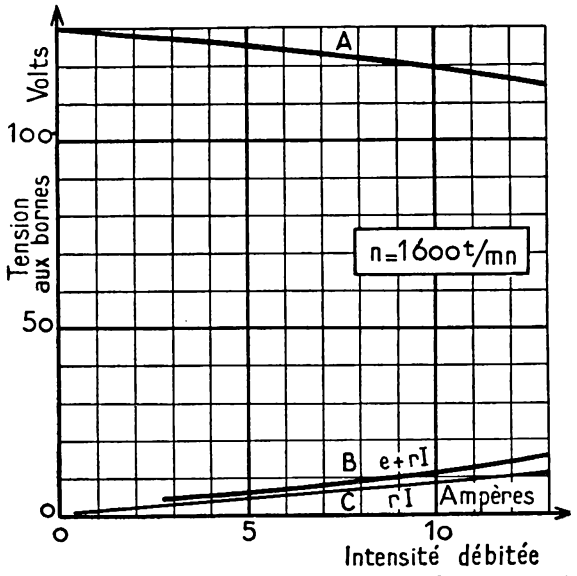


FIG. 11. — **Caractéristique en charge** d'une dynamo à excitation indépendante. A est la caractéristique en charge; B, la courbe de la chute de tension; C, la fraction de cette chute due à la résistance de l'induit.

I *ampères*	U *volts*
0	130
2	128
5	125
8	122
11	118
13	115

Ils ont servi à tracer la courbe A de la figure 11 qui est la **caractéristique en charge de la dynamo.**

Conclusions. — La tension baisse quand le débit croît.

A la différence E-U entre la f. é. m. E à vide et la tension U en charge, on donne le nom de **chute de tension en charge.**

Par exemple, quand la f. é. m. à vide est E = 130 *volts*, la tension aux bornes de la dynamo étudiée est U = 119 *volts* pour le débit de I = 10 *ampères;* la chute de tension est 11 *volts.*

La courbe B de la figure 11 représente la *chute de tension en charge.*

8. Causes de la chute de tension en charge.

La chute de tension est due :

1° à la **chute ohmique** *rI* produite par le courant I dans la résistance intérieure *r* de l'induit;

la dynamo choisie comme exemple a une résistance d'induit de 0,93 *ohm*, la chute ohmique y est 0,93 × 10 = 9,3 *volts* quand le débit est 10 *ampères*;

2° à la **réaction magnétique de l'induit** due à l'aimantation par le courant débité; le flux qui en résulte se combine avec le flux fourni par les inducteurs et, dans l'ensemble, l'affaiblit.

La réaction magnétique *e* de l'induit d'une dynamo à pleine charge ne dépasse pas 2,5 % de la f. é. m. E dans les petites machines; elle est plus faible encore dans les grosses.

Entre U et E existe la relation :

$$U = E - rI - e$$

qu'on limite à $U = E - rI$ quand une approximation de quelques centièmes est suffisante.

Au rapport $\frac{U}{E}$ on donne le nom **de rendement électrique de la dynamo** [1] parce que c'est le quotient de la puissance électrique débitée UI par la puissance électrique produite par la machine EI.

Pour corriger la baisse de tension aux bornes de la dynamo en charge, on met en série un **rhéostat de champ** dans le circuit inducteur de la machine (fig. 10). En augmentant le courant inducteur, le flux croît, la f. é. m. augmente et la tension aux bornes s'élève.

Parce que les courants inducteurs sont peu intenses, le fil résistant des rhéostats de champ est de petit diamètre, le nombre des plots est grand pour permettre un réglage précis.

C. — Théorie de la dynamo.

Pour rendre les figures plus lisibles, supposons que le tambour d'induit de la dynamo étudiée n'ait que 6 rainures (au lieu de 28), 12 conducteurs (au lieu de 672), et le collecteur 6 lames (au lieu de 56). Cette simplification extrême ne modifie en rien la théorie de la machine.

---

1. A ne pas confondre avec le *rendement industriel* qui est le rapport de la puissance utile P = UI débitée par la dynamo à ses bornes à la puissance mécanique totale P_t qu'elle absorbe à son arbre et qui lui est fournie par le moteur qui l'entraîne : $\eta = P : P_t$.

9. Comment se produit la f. é. m. de la machine?

*1° **Distribution du flux dans la machine excitée et arrêtée.*** — En suivant le trajet de ce flux à partir du noyau du pôle nord (fig. 1 et 12), vous remarquez que le flux s'épanouit dans la pièce polaire de ce pôle, traverse l'entrefer de faible longueur (1 à 2 *mm*), pour pénétrer dans l'induit. A la sortie de l'induit, il passe dans l'autre entrefer, puis dans la pièce polaire et le noyau du pôle sud. Ensuite, il se divise dans la culasse, moitié vers le haut, moitié vers le bas, pour achever de parcourir le circuit magnétique (fig. 1).

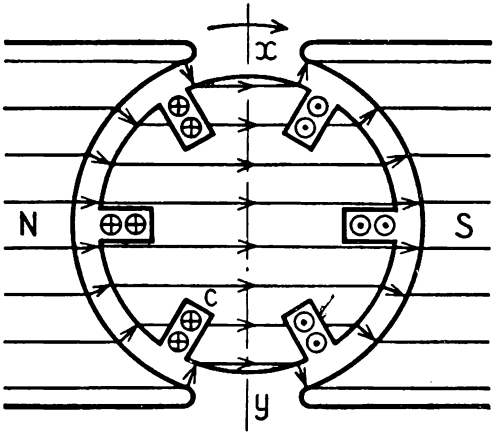


FIG. 12. — **Distribution du flux** dans la machine excitée et **sens des f. é. m.** induites dans les conducteurs qui coupent le flux sous les pôles.
La longueur de l'entrefer est très exagérée dans la figure pour rendre visibles les lignes de force.

*2° **Distribution du flux quand l'induit tourne.*** — La rotation de l'induit déforme un peu les lignes d'induction à cause de l'hystérésis, mais cette distorsion est faible et on peut admettre que la distribution du flux dans la dynamo est la même quand l'induit tourne ou lorsqu'il est arrêté.

L'effet de la rotation du tambour est d'entraîner l'enroulement de l'induit dans le flux fixe existant dans l'entrefer de la dynamo.

*3° **F. é. m. produites dans les conducteurs de l'induit.*** — *a*) Supposons d'abord que les connexions entre conducteurs d'une encoche à une autre et les connexions aux lames du collecteur n'existent pas. Les conducteurs sont limités à la partie qui se trouve dans les rainures.

Soit C l'un de ces conducteurs (fig. 12). Il se déplace sous le *pôle nord* dans le sens indiqué par la flèche. Dans ce mouvement, il fauche le flux sortant du pôle, donc il s'y induit une f. é. m. La règle des trois doigts en indique le sens que nous figurons par une croix dans le conducteur [1].

Quand le conducteur C, en continuant son mouvement, passe devant

1. La croix figure l'empennage d'une flèche traversant la figure d'avant en arrière le point, la pointe d'une flèche venant d'arrière en avant.

le *pôle sud*, appliquez de nouveau la règle des trois doigts, vous constatez que la f. é. m. produite est inversée. Nous indiquons ce sens par un point dans le conducteur.

En somme, *à droite du plan passant par la droite* xy *et l'axe de l'induit, les f. é. m. sont toutes d'un même sens; à gauche, elles sont toutes du sens contraire.*

b) La figure 13 indique comment les conducteurs sont connectés entre eux pour que les f. é. m. induites s'ajoutent.

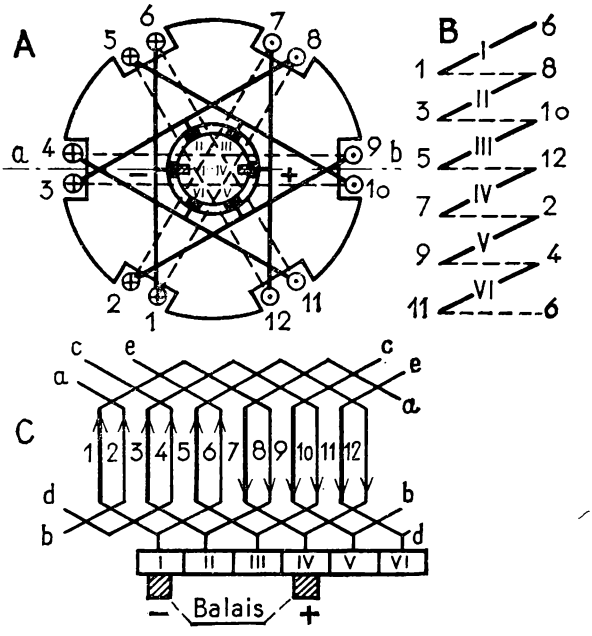


FIG. 13. — **Connexions entre les conducteurs de l'induit.** Dans la figure A, les balais ont été indiqués à l'intérieur du collecteur, faute de pouvoir les figurer à leur place réelle à l'extérieur.

Le conducteur 1 est réuni sur la face arrière de l'induit au conducteur 8 qui lui est presque diamétralement opposé; le conducteur 8 est réuni sur la face avant au conducteur 3 en passant par la lame II du collecteur; puis le conducteur 3, à l'arrière, est relié au conducteur 10... et ainsi de suite pour revenir finalement au conducteur 1 sur la face avant et fermer l'enroulement.

Le *pas de l'enroulement* est 7 sur la face arrière de l'induit et 5 sur la face avant.

La figure 13 rapproche trois modes conventionnels de représentation de l'enroulement :

A est la vue simplifiée de l'induit, côté collecteur;

B un tableau des liaisons des conducteurs entre eux et avec les lames du collecteur;

C le développement de la surface du cylindre de l'induit, supposée

coupée entre les conducteurs 12 et 1 et étalée sur une surface plane.

c) Vous avez remarqué que toutes les f. é. m. ne sont pas couplées en série; à partir du conducteur 7, on les rencontre en sens contraire du sens trouvé jusque-là.

Parcourons l'enroulement en partant de la lame I du collecteur en tournant vers la gauche. Nous suivons une section de bobinage formée des conducteurs 1 et 8 pour arriver à la lame II du collecteur [1]. Cette section est comparable à un élément de pile puisqu'il s'y produit une f. é. m. Entre les lames II et III, une autre section comprenant les conducteurs 3 et 10 est en série avec la précédente. En continuant ainsi, nous constatons que les 6 sections de l'enroulement assimilables à des éléments de pile sont couplées par 3 en série, et les 2 séries, en parallèle comme l'indique la figure 14.

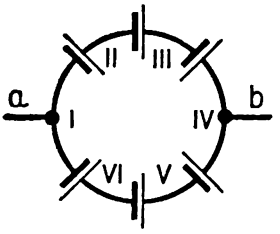


FIG. 14. — Les sections d'enroulement sont couplées comme les éléments de cette pile; en deux séries mises en parallèle.

Les lames I et IV du collecteur sont les pôles de la batterie ainsi formée.

La distribution des f. é. m. n'est pas changée par la rotation de l'induit. Les pôles sont toujours les lames du collecteur qui se trouvent sur la ligne *ab* fixe dans l'espace. Les balais sont placés sur ces lames. La ligne *ab* est nommée *ligne neutre* ou *ligne de calage des balais*.

Remarque. — Puisque les conducteurs de l'induit sont couplés en deux séries parallèles, ils sont parcourus par la moitié I : 2 du courant I débité par la dynamo.

10. Calcul de la f. é. m. d'une dynamo bipolaire.

Soient : Φ wébers le flux dans l'entrefer sous l'un des pôles,
N le nombre de conducteurs de l'induit,
n le nombre de tours par seconde de l'induit.

Un conducteur de l'induit fait un tour complet en 1:n *seconde*. Pendant ce temps, il fauche 2 fois le flux Φ puisqu'il passe sous chaque pôle. La f. é. m. moyenne induite dans le conducteur est donc :

$$2\Phi : \frac{1}{n} = 2n\Phi \text{ volts.}$$

1. En réalité, une section d'enroulement d'induit comprend souvent plusieurs spires, par exemple le conducteur venant de 1 et, allant en 8, retourne en 1 et effectue plusieurs fois le parcours 1-8 avant d'être soudé à la lame II.

Or $\frac{N}{2}$ conducteurs sont en série, la f. é. m. totale de la dynamo *bipolaire* est :

$$E = 2n\Phi \times \frac{N}{2} = Nn\Phi.$$

Cette formule

$$\boxed{E = N \cdot n \cdot \Phi}$$

volts conduc. t/s webers

confirme et précise les constatations du paragraphe 5 : **la f. é. m. est proportionnelle :**

1° **au nombre de conducteurs de l'induit,**
2° **à la vitesse de rotation de l'induit,**
3° **au flux inducteur sous un pôle.**

Rappelons que le produit $N.n.\Phi$ doit être divisé par 100 millions quand l'unité de flux employée est le *maxwell.*

RÉSUMÉ

1. — Une dynamo bipolaire se compose d'un gros électro-aimant immobile nommé *inducteur*, qui produit un flux magnétique important dans ses deux entrefers; d'un *induit* qui, en tournant, déplace dans le flux inducteur les conducteurs de son enroulement; d'un *collecteur* dont les lames sont soudées à des conducteurs de l'induit et de *balais* qui sont les bornes de prise du courant produit par la machine

2. — Dans chacun des conducteurs, parce qu'ils coupent le flux, s'induit une f. é. m. Les conducteurs sont réunis les uns aux autres de sorte que l'induit est comparable à une pile d'un grand nombre d'éléments; ces éléments sont répartis en deux groupes; dans chacun ils sont couplés en série et les deux groupes sont mis en parallèle.

3. — La f. é. m. produite par une dynamo bipolaire est :

$$E = Nn\Phi,$$

E est en volts, Φ est le flux inducteur sous un pôle en wébers, N le nombre des conducteurs de l'induit, n la vitesse de rotation de l'induit en tours par seconde.

4. — En charge, la tension aux bornes d'une dynamo est très sensiblement : $U = E - rI.$

EXERCICES

1. Les pièces polaires des pôles inducteurs des dynamos sont feuilletées quand le tambour d'induit est denté. Expliquer pourquoi.

2. Une dynamo fournit 115 *V* en tournant à vide à la vitesse de 1 600 *t/mn.* Quelle f. é. m. donne-t-elle à 1 200 *t/mn?* A 1 800 *t/mn?* Le flux inducteur conserve la même valeur à toutes les vitesses de rotation.

Réponses : 86 *V*, 129 *V.*

3. Le tambour d'induit d'une petite dynamo bipolaire possède 28 encoches; dans chaque encoche, il y a 24 conducteurs. En tournant à vide à 1 600 *t/mn*, la machine produit une f. é. m. de 115 *V*. Calculer le flux en maxwells sous un pôle. (La réponse sera donnée avec trois chiffres significatifs seulement.)

Réponse : 0,0063 *wéber.*

4. Une dynamo, dont la f. é. m. est 230 *volts*, débite un courant de 16 *ampères.* La résistance de l'induit, mesurée entre bornes, est 1,2 *ohm.* Quelle est la tension aux bornes de la machine? Quelle puissance fournit-elle?

Réponses : 211 *volts*, 3 376 *watts.*

5. L'induit d'une dynamo bipolaire est bobiné avec du fil dont la section est 5 *mm²*. Le nombre des conducteurs est 860. L'induit tourne à la vitesse de 1 200 *t/mn.* Il débite 40 *A* sous la tension de 110 *V* dans un circuit extérieur. La résistance de l'induit mesurée entre balais est 0,15 Ω.

Calculer :

1° la f. é. m. produite en charge;
2° le flux inducteur;
3° la densité de courant dans les conducteurs de l'induit;
4° l'énergie perdue en chaleur Joule en 1 heure dans l'induit.

Réponses : 1° 116 *volts*; 2° 0,00675 *wéber*; 3° 4 *A/mm²*; 4° 240 *watts-heures.*

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

1. Pièces détachées de dynamos. — Pour préciser la description d'une dynamo, se procurer chez un constructeur une tôle d'inducteur, une tôle d'induit, une lame de collecteur, une section d'induit.

2. Enroulements d'induits. — Il n'est pas utile d'insister dans le cours sur la question des enroulements d'induits. Elle n'intéresse que les bobineurs qui, eux, ont besoin de l'étudier avec détails. Pourtant les autres électriciens doivent avoir une idée claire de l'agencement d'un enroulement très simple.

Le plus sûr, pour la leur donner, est de fabriquer, en bois, un modèle d'induit simplifié. Le tambour, constitué par des disques en bois collés, portera seulement

8 encoches; sur l'une de ses bases, pour figurer le collecteur, sera rapporté un cylindre en bois où 16 lames seront dessinées. Chaque lame portera un petit piton pour les connexions avec l'enroulement (fig. 15).

Les élèves exécuteront, avec de la ficelle, plusieurs sections d'enroulement consécutives, chacune de 4 spires.

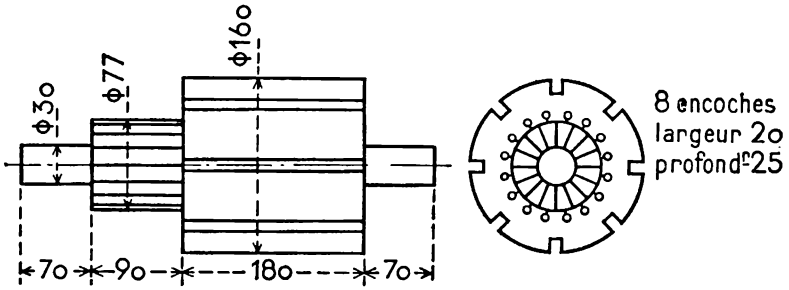


FIG. 15. — Dessin d'exécution d'un **modèle d'induit** en bois.

3. Commande des machines électriques. — Les quelques génératrices et moteurs affectés au matériel d'enseignement de l'électricité doivent pouvoir se commander indifféremment les unes les autres. Le moyen le plus simple, pour arriver à ce résultat, est d'uniformiser la vitesse tangentielle de leurs poulies. On changera les poulies dont les a munies le constructeur pour obtenir une vitesse de 12 *mètres par seconde.*

Différents modes d'excitation des dynamos.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une dynamo shunt, 115 volts, 2 000 watts, 1 600 tours par minute (*voir* 25e *leçon*).
Un moteur à courant continu, de 2 *ou* 3 chevaux *avec rhéostat de démarrage et* 1 *rhéostat de champ.*
Un compte-tours avec une montre à secondes ou 1 *tachymètre.*
Un voltmètre à cadre mobile à plusieurs sensibilités.
Un ampèremètre calibre 20 ampères.
Une lampe 60 watts, 110 volts, *sur socle à bornes.*
Un rhéostat de champ d'au moins 60 ohms.
Un rhéostat de lampes, 2 000 watts, 115 volts.
Une dynamo série et 1 *dynamo compound ne sont pas indispensables.*

LEÇON

Reportez-vous à l'étude expérimentale de la dynamo faite au cours de la leçon précédente : nous avons fait passer dans l'inducteur un courant continu fourni par le secteur, ou par une batterie d'accumulateurs ou par une autre dynamo : la dynamo étudiée était à **excitation indépendante.**

En réalité, presque toutes les dynamos usuelles fournissent elles-mêmes le courant qui aimante leurs inducteurs : elles sont dites à **auto-excitation.**

Mais une dynamo à l'arrêt, quand on va la mettre en marche, ne produit pas encore de courant à faire passer en partie ou en totalité dans les bobines inductrices : comment donc le flux inducteur, nécessaire à son fonctionnement, naît-il quand on fait tourner la machine; en d'autres termes, comment la dynamo s'*amorce*-t-elle?

Une dynamo est **amorcée** *quand, tournant à peu près à sa vitesse de régime, elle fournit, par auto-excitation, une f. é. m. voisine de sa f. é. m. normale.*

A. — Amorçage des dynamos.

1. L'inducteur d'une dynamo conserve, en général, un faible flux rémanent.

Nous le constatons de la façon suivante :

Montage. — Disposons la dynamo étudiée pour la faire fonctionner à vide. Le circuit inducteur est coupé et *aucun courant ne passe dans l'inducteur.* Un voltmètre sensible (calibre 3 *volts*) est monté entre les bornes de l'induit (fig. 1).

Lectures. — Faisons tourner l'induit à peu près à sa vitesse normale (1 600 *t/mn*). Le voltmètre indique une faible f. é. m. de l'ordre de 2 *volts.*

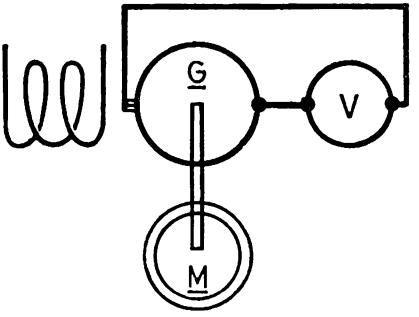


FIG 1. — Aucun courant ne passe dans l'inducteur et pourtant la dynamo fournit une faible f. é. m. due au **flux rémanent.**

Interprétation. — C'est que la machine, qui a fonctionné antérieurement, a conservé une faible *aimantation rémanente;* un flux peu important, environ un cinquantième du flux normal, subsiste dans la carcasse et, par conséquent, dans les entrefers. Il suffit pour produire la f. é. m. constatée.

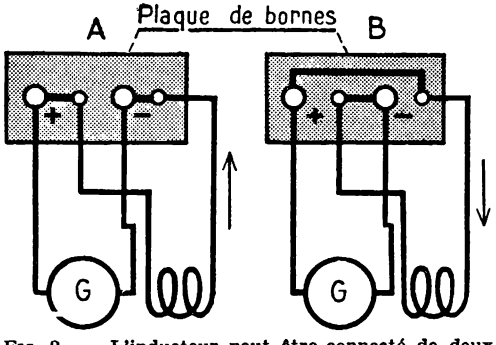


FIG. 2. — L'inducteur peut être connecté de deux façons aux bornes de l'induit. Le courant inducteur est de sens contraires dans les deux montages.

2. Cette faible f. é. m. suffit pour amorcer la dynamo.

Montage. — Connectons l'inducteur aux bornes de l'induit, d'abord suivant le schéma A, ensuite suivant le schéma B de la figure 2. Il est dit *monté en dérivation.*

Expérience. — En faisant tourner la machine aux environs de sa vitesse normale,

vous constatez qu'avec l'un des montages la dynamo s'amorce, et qu'avec l'autre elle ne s'amorce pas.

Explication. — Dès que l'induit a atteint une vitesse suffisante, le flux rémanent produit une f. é. m. d'environ 2 *volts* dans le circuit fermé constitué par l'enroulement de l'induit et les bobines inductrices. Il en résulte un courant, courant peu intense, car la f. é. m. est faible et la résistance du circuit est grande (113 *ohms* dans la machine prise comme exemple).

Ou bien ce courant est de sens tel que le flux qu'il produit augmente le flux rémanent, la f. é. m. croît, le courant s'intensifie, le flux augmente davantage et, en quelques instants, la machine s'amorce.

Ou bien le courant est de sens tel qu'il diminue le flux rémanent, la faible f. é. m. initiale décroît, la dynamo ne s'amorce pas.

Donc une condition d'amorçage de la dynamo est que le courant inducteur initial soit de sens convenable. On peut changer ce sens :

soit en croisant les connexions de l'inducteur aux bornes de l'induit;

soit en changeant le sens de rotation de l'induit, pour inverser le sens de la f. é. m. due au magnétisme rémanent.

3. La résistance du circuit inducteur intervient dans l'amorçage.

a) ***Faits expérimentaux.*** — 1° Dans le circuit de l'inducteur branché dans le sens convenable pour l'amorçage, plaçons, en guise de résistance, une lampe de 60 *watts*, 110 *volts*. La résistance du circuit inducteur est plus que triplée.

L'induit tournant à sa vitesse normale, la f. é. m. obtenue n'est que 4 ou 5 *volts*.

2° Remplaçons la lampe par un rhéostat de champ d'une soixantaine d'ohms.

La f. é. m. obtenue à vitesse normale est 103 *volts*.

3° Mettons le rhéostat de champ hors circuit.

La f. é. m. atteint 143 volts.

L'étude de la caractéristique à vide de la dynamo explique que la machine ne s'amorce pas si la résistance du circuit inducteur est trop grande.

b) ***Étude de la caractéristique à vide.*** — Soit sur la caractéristique (fig. 3) un point A correspondant à une f. é. m. obtenue dans une expérience. La valeur de cette f. é. m. est représentée à l'échelle de la figure par la droite *aA*. L'intensité *i* du courant d'excitation qui a produit cette f. é. m. E est mesurée par *Oa*.

Le rapport $\frac{E}{i}$ est la résistance R du circuit inducteur.

Or, cette résistance $R = \frac{E}{i}$ est représentée sur la figure, compte tenu des échelles, par le rapport $\frac{aA}{Oa}$. Vous savez que ce rapport définit la tangente de l'angle α [1]. Donc la tangente de l'angle α est égale à la résistance R de l'inducteur.

Quand la résistance R est très grande, l'angle α est voisin de 90°. La droite OA est proche de OE perpendiculaire à O*i*, le point A peu éloigné de O, c'est-à-dire que la f. é. m. est faible.

Quand la résistance R diminue, l'angle α décroît, le point A s'élève sur la courbe, la f. é. m. croît.

L'amorçage est effectué quand A dépasse le point B sur l'arc BC; la résistance du circuit inducteur doit être inférieure à $R' = \frac{bB}{Ob}$ pour qu'il soit possible.

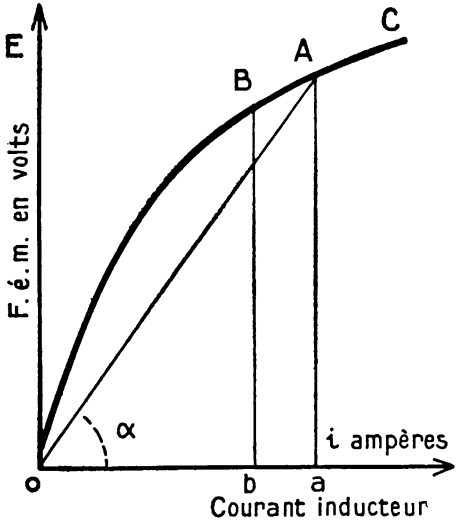


FIG. 3. — **Caractéristique à vide** de la dynamo. Le point A est le point de fonctionnement normal. La tangente de l'angle α indique la résistance formée par l'induit et l'inducteur.

4. Résumé des conditions d'amorçage d'une dynamo.

1° *L'existence d'une aimantation rémanente.* Si elle manque, on fait passer dans l'inducteur, pour la produire, un courant continu fourni par une source quelconque dans le circuit inducteur.

2° *Un sens convenable du courant inducteur initial.* On l'obtient par le couplage de l'inducteur et de l'induit ou par le sens de rotation de l'induit.

3° *La résistance non excessive de l'inducteur.*

---

1. Vous savez que la tangente d'un angle aigu est voisine de zéro quand l'angle est tout petit, qu'elle augmente quand l'angle grandit, qu'elle est extrêmement grande quand l'angle approche de 90°.

B. — Dynamos excitées en dérivation.

Ces machines sont aussi nommées **dynamos shunt.**

5. Le circuit inducteur est monté en dérivation entre les bornes de l'induit.

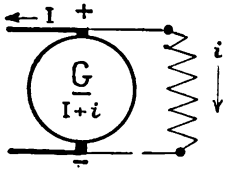


FIG. 4. — Symbole d'une **dynamo Shunt.**

Pour ne dépenser dans le circuit inducteur que quelques centièmes du courant produit par la machine à pleine charge (environ 5 % pour les petites dynamos, 1 % pour les grosses), l'enroulement des bobines inductrices est fait d'un grand nombre de spires de fil fin (fig. 4).

Aussi reconnaît-on une dynamo shunt à l'aspect de ses bobines inductrices.

6. Une dynamo excitée en dérivation s'amorce à vide.

Nous l'avons constaté en étudiant l'amorçage des dynamos.

7. Caractéristique en charge d'une dynamo shunt.

Comme nous l'avons fait avec une dynamo à excitation indépendante, en laissant sa *vitesse de rotation invariable, sans toucher au circuit inducteur,* faisons débiter à la dynamo shunt des courants croissants dans un rhéostat de charge en mesurant différentes valeurs de la tension aux bornes et des débits correspondants (fig. 5).

Les résultats des mesures sont consignés dans le tableau ci-dessous.

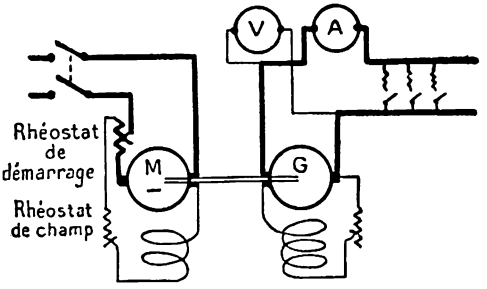


FIG. 5. — Montage d'une dynamo shunt pour obtenir sa **caractéristique en charge.**

DEBIT *I ampères*	TENSION *U volts*
0	130
3	125
5	121
8	116
9	114
13	104

Ils ont servi à tracer la courbe figure 6. C'est **la caractéristique externe de la dynamo shunt.**

Elle ressemble beaucoup à celle de la même dynamo à excitation indépendante que nous avons tracée dans la leçon précédente, mais la chute de tension en charge, pour le même débit, est plus grande pour la dynamo shunt.

Cette différence s'explique si l'on remarque qu'aux deux causes de la chute de tension d'une dynamo à excitation indépendante, savoir la chute ohmique due à la résistance de l'induit et la réaction magnétique d'induit, s'en ajoute une autre pour la dynamo shunt : la diminution du courant inducteur, conséquence de la baisse de tension aux bornes du circuit inducteur.

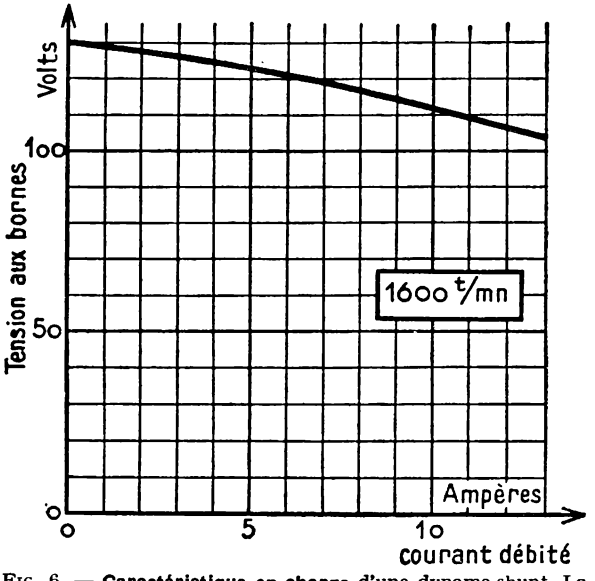


FIG. 6. — **Caractéristique en charge** d'une dynamo shunt. La chute de tension à pleine charge est 26 *volts*.

La relation approchée :

$$U = E - rI$$

convient aussi à la dynamo shunt ; toutefois :

1° E n'est pas la f. é. m. de la machine à vide produite par le courant inducteur $i = \frac{E}{R}$, mais la f. é. m. plus faible correspondant au courant inducteur $i = \frac{U}{R}$;

2° le courant I dans l'induit est la somme du courant I′ débité dans le circuit extérieur et du courant inducteur i :

$$I = I' + i.$$

8. Les dynamos shunt sont très employées.

Signalons que la chute de tension en charge pour les dynamos puissantes excitées en dérivation est beaucoup plus faible que dans la petite

machine que nous avons étudiée, elle est seulement, à pleine charge, de l'ordre de 5 % de la tension à vide.

On la corrige par la manœuvre d'un *rhéostat de champ.*

Les machines shunt conviennent bien à la charge des batteries d'accumulateurs.

C. — Dynamos excitées en série.

9. Les bobines inductrices d'une dynamo série sont faites d'un petit nombre de spires de gros fil.

Le courant débité par l'induit en charge parcourt les bobines inductrices en série avec l'induit (fig. 7). Un petit nombre de spires suffit pour obtenir les ampères-tours nécessaires à l'aimantation de l'inducteur. Il faut du fil de gros diamètre pour éviter un échauffement exagéré des bobines et aussi pour réduire la chute ohmique dans la machine.

Donc *les bobines inductrices d'une dynamo série sont faites de peu de spires de gros fil.*

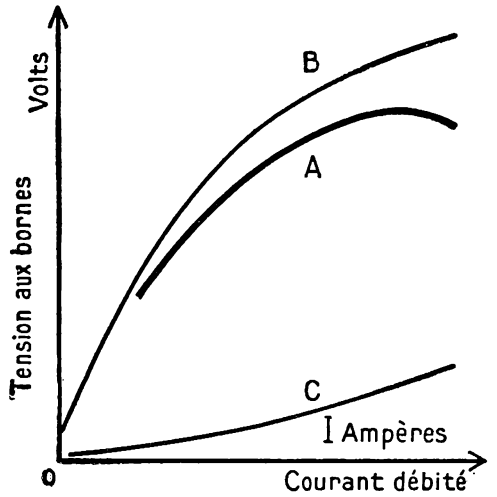


FIG. 8. — Tracé de la **caractéristique en charge A** d'une dynamo série à partir de la caractéristique à vide B et de la courbe C de la chute de tension en charge de la machine quand elle fonctionne à excitation indépendante.

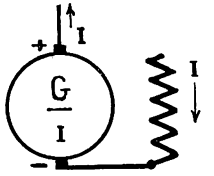


FIG. 7. — Symbole d'une **dynamo série.**

10. Propriétés d'une génératrice série.

a) ***A vide.*** — *Une dynamo série ne s'amorce pas à vide* puisque aucun courant ne passe alors dans l'inducteur.

b) **En charge.** — Il est facile de tracer la **caractéristique en charge** d'une dynamo série à partir de sa caractéristique à vide.

La tension aux bornes U a pour valeur

$$U = E - [(R + r)\ I + e],$$

elle est la différence entre la f. é. m. à vide E pour l'excitation I et la chute de tension en charge pour le débit I.

Dans la figure 8, la courbe de E, caractéristique à vide, est la ligne B; la courbe de la chute de tension en charge qui est une droite si l'on néglige la réaction magnétique d'induit *e* peu importante est la ligne C. La caractéristique en charge A s'obtient en faisant la différence des ordonnées de B et C pour les mêmes abscisses.

La tension U aux bornes, faible quand le courant débité est peu intense, croît quand le débit augmente, passe par un maximum et diminue ensuite quand le courant débité continue à croître.

11. Les dynamos série sont peu employées comme génératrices.

Elles ne conviennent pas pour alimenter un réseau de distribution parce qu'elles sont incapables de maintenir une tension entre les deux fils d'une ligne à vide ou peu chargée.

On ne les emploie comme génératrices qu'en combinaison avec des dynamos shunt dans des montages exceptionnels.

D. — Dynamos à excitation composée.

12. Les dynamos à excitation composée ou dynamos compound sont à la fois shunt et série.

Une dynamo compound possède deux circuits d'aimantation de l'inducteur; l'un, le plus important, est en dérivation aux bornes de l'induit; l'autre, en série.

Sur le noyau de chaque pôle sont enfilées deux bobines; l'une, de beaucoup la plus grosse, est faite d'un grand nombre de spires de fil fin, c'est la bobine shunt; l'autre de quelques spires de gros fil est la bobine série (fig. 9). Les deux bobines produisent des flux dans le même sens.

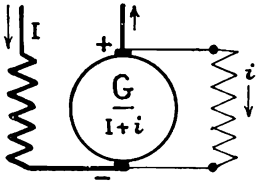


FIG. 9. — Symbole d'une dynamo compound.

La figure 10 représente la plaque de bornes d'une dynamo compound.

L'enroulement shunt peut être branché :

soit directement aux bornes de l'induit, la dynamo est dite *à courte dérivation;*

soit, après couplage de l'induit et de l'enroulement série, aux bornes de l'ensemble, la machine est dite *à longue dérivation.*

13. Propriétés d'une dynamo compound.

a) ***A vide.*** — Une dynamo compound s'amorce à vide sous l'action de l'enroulement shunt.

b) ***En charge.*** — L'enroulement série parcouru par le courant débité renforce le flux inducteur et augmente la f. é. m.

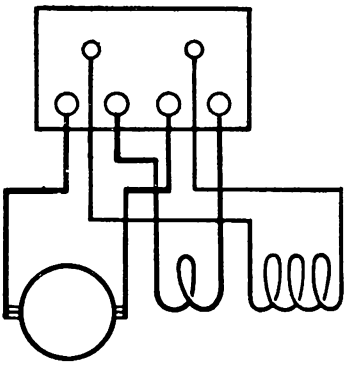


FIG. 10. — **Plaque de bornes d'une** dynamo compound. Indiquer les connexions du montage en **courte dériva·ion** puis du montage en **longue dérivation.** Figurer le départ de la ligne extérieure.

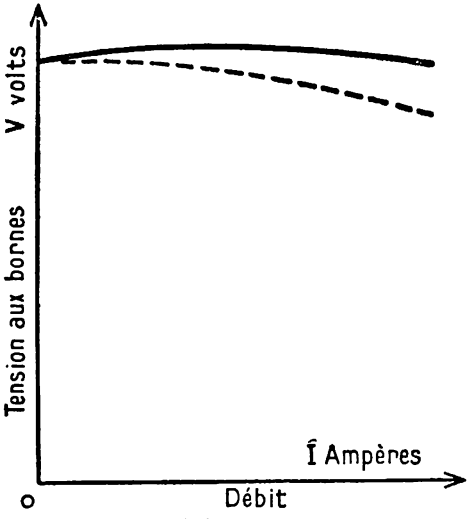


FIG. 11. — Caractéristique en charge d'une **dynamo compound.** En pointillé est figurée la caractéristique obtenue avec l'enroulement shunt seul.

En donnant aux bobines série un nombre de spires convenable, on compense la chute de tension à pleine charge.

Ainsi la tension aux bornes de la dynamo compound ne varie guère avec la charge. La figure 11 est la **caractéristique en charge** d'une telle dynamo.

Le rhéostat de champ ne sert plus qu'à régler une fois pour toutes la tension de la machine à la valeur désirée.

En augmentant le nombre de spires de l'enroulement série, on compense, outre la chute de tension en charge dans la machine, la chute ohmique dans la ligne qui conduit le courant à son lieu d'utilisation, la dynamo est alors **hypercompound.**

14. Usages des dynamos compound.

A cause de la constance de la tension qu'elles fournissent, les dynamos compound servent à alimenter les centrales électriques à courant continu, par exemple celles qui desservent les réseaux de traction.

RÉSUMÉ

1. — Les dynamos à *auto-excitation* produisent elles-mêmes le courant qui aimante leur inducteur.

2. — L'enroulement inducteur *des dynamos excitées en dérivation* est branché entre les bornes de l'induit Les bobines inductrices sont faites d'un grand nombre de spires de fil fin.

Les dynamos shunt s'amorcent à vide. La tension à leurs bornes diminue quand elles débitent un courant. On règle cette tension avec un rhéostat de champ. Elles servent surtout à charger les batteries d'accumulateurs.

3. — Dans les *dynamos série*, les bobines inductrices, faites de peu de spires de gros fil, sont en série avec l'induit. Ces machines ne s'amorcent pas à vide. La tension à leurs bornes varie beaucoup avec l'intensité du courant débité. Elles ne sont guère employées comme génératrices.

4. — Les *dynamos compound* ont deux enroulements inducteurs. L'un important, en fil fin, est en dérivation sur l'induit ; l'autre, de peu de spires de gros fil, en série avec l'induit.

Les dynamos compound s'amorcent à vide. La tension à leurs bornes est toujours la même, quel que soit le courant débité.

Ce sont des génératrices très employées.

EXERCICES

1. Imaginer plusieurs moyens de vérifier que l'enroulement série d'une dynamo compound est branché à la plaque de bornes dans le sens convenable pour que le flux qu'il produit soit de même sens que le flux dû à l'enroulement shunt, sans qu'il soit besoin de faire tourner la machine.

2. L'enroulement de l'induit d'une petite dynamo bipolaire a été bobiné avec 252 *m* de fil de cuivre de 1,3 *mm* de diamètre. Calculer la résistance intérieure de l'induit.

Réponse : 0,82 *ohm.*

3. Chacune des deux bobines inductrices de la dynamo shunt de l'exercice précédent comprend 2 500 spires d'un fil de cuivre de diamètre 0,7 *mm.* La longueur moyenne d'une spire est 0,55 *m.*

Calculer la longueur totale du fil de l'inducteur.

Calculer sa résistance.

Réponses : 1° 2 750 *mètres ;* 2° 114 *ohms.*

4. Une dynamo shunt bipolaire, dont l'induit a une résistance de 0,82 Ω et l'inducteur de 114 Ω, débite 16 A dans un circuit extérieur avec une tension de 115 V à ses bornes.

1° Quelle est l'intensité du courant inducteur?

2° Quelle est la puissance dépensée pour l'excitation?

3° Quelle est l'intensité du courant dans l'induit?

4° Calculer, en négligeant la réaction magnétique d'induit, la f. é. m. de la dynamo.

Réponses : 1° 1 *ampère*; 2° 115 *watts*; 3° 17 *ampères;* 4° 129 *volts.*

5. Une dynamo compound (courte dérivation) fournit à pleine charge 120 A sous 125 V. Quelle puissance débite-t-elle?

Son enroulement shunt a une résistance de 43 Ω. Calculer l'intensité dans cet enroulement et la puissance consommée pour l'excitation en dérivation.

La résistance de l'enroulement série est 0,02 Ω. Quelle est la puissance consommée à pleine charge pour l'excitation série?

Quel pourcentage de la puissance utile fournie par la dynamo représente la puissance dépensée pour l'excitation?

Réponses : 1° 15 *kW;* 2° 2,9 *A;* 3° 362 *W;* 4° 288 *W;* 5° 650 *W;* 6° 4,3 %.

6. L'induit d'une dynamo compound a une résistance de 0,04 *ohm* entre balais. La résistance de l'enroulement série est 0,01 *ohm*; celle de l'enroulement shunt 43 *ohms.*

La machine est montée à *courte dérivation.* Elle débite 120 *ampères* sous 125 *volts* dans le circuit extérieur.

1° Quelle est la tension aux bornes de l'induit?

2° Quelle est l'intensité du courant dans l'enroulement shunt?

3° Quelle est l'intensité du courant dans l'induit?

4° Quelle est la f. é. m. de la dynamo?

On monte la dynamo à *longue dérivation.* On suppose que la tension aux bornes reste 125 *volts.*

5° Quelle est l'intensité du courant dans l'enroulement shunt?

La différence entre les deux montages de l'enroulement shunt a-t-elle des conséquences importantes?

Réponses : 126, 2 *V;* — 2,93 *A;* — 123 *A;* — 131 *V;* — 2,90 *A.*

Dynamos multipolaires.

LEÇON

On ne construit guère de dynamos bipolaires de plus de 5 kilowatts. Pour des puissances supérieures, afin de mieux utiliser la matière et de diminuer les dimensions d'encombrement, on munit l'anneau circulaire constituant le bâti de plusieurs paires de pôles (fig. 1). La dynamo est **multipolaire.** Il existe des génératrices ayant 24 pôles et même davantage.

1. Constitution de l'inducteur.

Pour que pôles nord et pôles sud alternent sur la culasse de la machine, le nombre des pôles est toujours pair.

Chaque pôle, rapporté ou venu de fonte avec le bâti, est pourvu de pièces polaires feuilletées.

Les bobines inductrices sont montées en série[1].

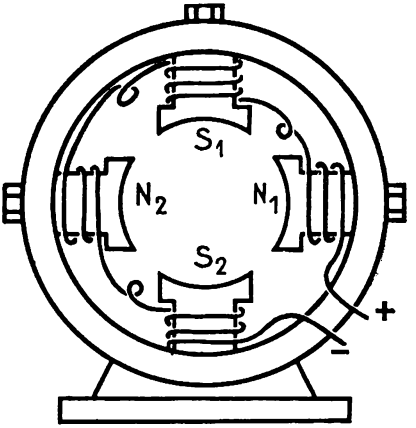


FIG. 1 — **Inducteur de dynamo tétrapolaire.** Les pôles sont alternativement nord et sud.

2. Induit, collecteur et balais de dynamos multipolaires.

L'induit en tambour denté diffère seulement d'un tambour de machine bipolaire parce qu'il est évidé dans sa partie centrale et claveté sur l'arbre par l'intermédiaire d'un croisillon en fonte (fig. 2).

Le collecteur et les balais sont identiques à ceux des dynamos à deux pôles.

1. Ce qui ne signifie pas que la dynamo est excitée en série.

3. Distribution du flux dans une machine tétrapolaire.

A partir d'un pôle nord N_1 (fig. 2), en suivant une ligne d'induction, on rencontre une pièce polaire, un entrefer, puis les dents et les rainures de l'induit. Le flux se partage alors vers les pôles S_1 et S_2 voisins. Le circuit se continue de chaque côté par des dents et des encoches, des entrefers, des pièces polaires, les noyaux S_1 et S_2, et se ferme par la culasse.

Vous remarquez que le flux ne passe pas par la partie centrale du tambour, c'est pourquoi on peut évider l'induit.

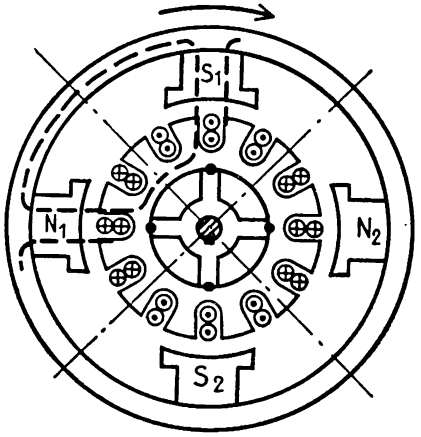


FIG. 2. — Trajet du flux et sens des f. é. m. dans les conducteurs de l'induit d'une dynamo tétrapolaire.

4. F. é. m. produites dans les conducteurs de l'induit.

Nous supposons d'abord que les conducteurs sont des barres sans connexions entre elles et logées dans les rainures du tambour.

Le sens de rotation de l'induit est indiqué sur la figure 2 par une flèche.

En se servant de la règle des trois doigts, nous déterminons le sens de la f. é. m. induite dans chaque conducteur.

D'après ce sens, *les conducteurs se répartissent en quatre groupes, soit un groupe par quadrant de l'induit correspondant à chaque pôle.*

5. Connexions des conducteurs entre eux et au collecteur.

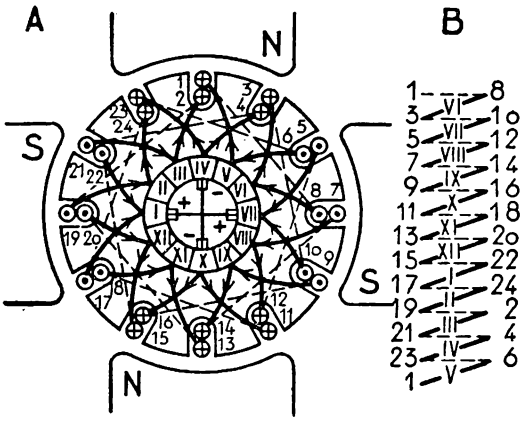
Pour que les f. é. m. induites dans les conducteurs s'ajoutent, un conducteur pris sous un pôle est réuni à un conducteur placé à peu près de la même façon sous le pôle de nom contraire voisin.

Nous n'indiquerons que deux exemples d'enroulements de dynamos tétrapolaires, simplifiés par la réduction du nombre d'encoches de l'induit, du nombre de conducteurs, de spires par section d'enroulement et de lames au collecteur.

a) ***Enroulement imbriqué.*** — L'induit de la figure 3 possède 12 rainures; dans chaque rainure sont deux conducteurs; il y a 12 lames au collecteur; chaque section d'enroulement est constituée d'une seule spire.

Le pas de l'enroulement est 7 sur la face arrière du tambour et 5 du côté du collecteur.

Remarquez qu'en suivant l'enroulement comme l'indique le tableau B de la figure 3, on progresse sur le tambour dans un certain sens en allant du conducteur 1 au conducteur 8, puis on revient *en arrière* en continuant de 8 à 3 par la lame VI du collecteur. Il en résulte que *chaque section de l'enroulement recouvre en partie la section précédente*, c'est pourquoi l'on nomme ce type d'enroulement **enroulement imbriqué.**



Le sens des f. é. m. dans les connexions au collecteur indique la place de 4 balais, 2 positifs aux lames I et VII,

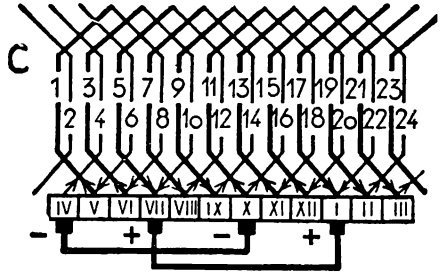


FIG. 3. — **Enroulement imbriqué** d'une dynamo tétrapolaire. Les figures B et C sont des schémas de cet enroulement.

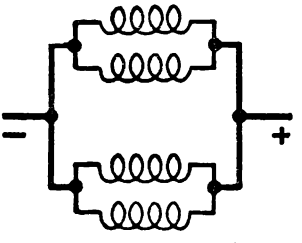


FIG. 4. — Une dynamo tétrapolaire dont l'enroulement est imbriqué équivaut à deux dynamos bipolaires **en parallèle.**

2 négatifs aux lames IV et X. Les balais de même nom sont réunis ensemble. *La dynamo tétrapolaire est assimilable à un groupe de deux dynamos bipolaires couplées en parallèle* (fig. 4). Aussi l'enroulement imbriqué se nomme-t-il parfois **enroulement en parallèle.**

Il convient pour les dynamos destinées à débiter une forte intensité sous faible tension.

Des courants de circulation dans l'induit sont à craindre si les entrefers

sous les pôles de même nom n'ont pas rigoureusement la même longueur. On les détourne dans des conducteurs spéciaux, placés sur la face avant du tambour, et réunissant quelques lames du collecteur entre lesquelles la tension devrait être nulle si la machine était parfaitement symétrique, telles que les lames V et XI, VI et XII, etc., dans la dynamo étudiée. Ces conducteurs d'équilibre nommés **connexions équipotentielles** ne sont employées que dans des dynamos de grande puissance.

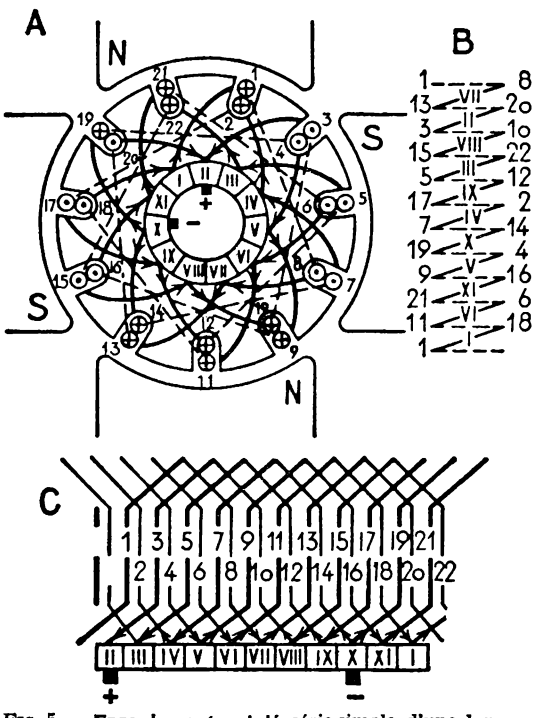


Fig. 5. — Enroulement ondulé, série simple, d'une dynamo tétrapolaire.

b) ***Enroulement ondulé.*** — Un tel enroulement est représenté par la figure 5.

Le tambour porte 11 rainures, dans chaque rainure sont deux conducteurs, le collecteur est fait de 11 lames.

Le pas de l'enroulement est 7 sur la face arrière de l'induit et 5 du côté du collecteur. A la différence de l'enroulement imbriqué, on passe d'un conducteur au suivant en progressant toujours dans le même sens par rapport au tambour. Les conducteurs et leurs connexions dessinent des ondes dans le schéma en développement figure 5 C, d'où le nom d'**enroulement ondulé** donné à cette disposition.

Le sens des f. é. m. dans les connexions au collecteur indique qu'il y a seulement 2 balais à 90° sur le collecteur. *La dynamo tétrapolaire est assimilable à un groupe de deux dynamos bipolaires en série* (fig. 6).

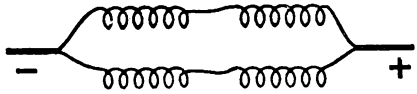


Fig. 6. — Une dynamo tétrapolaire avec enroulement série simple équivaut à deux dynamos bipolaires en série.

L'enroulement décrit se nomme **enroulement ondulé série simple.**

En choisissant convenablement le nombre de sections d'enroulement, les pas avant et arrière, le nombre de lames au collecteur, on réalise des enroulements ondulés avec autant de lignes de balais que de pôles inducteurs, donc en parallèle, des enroulements série simple, des enroulements séries parallèle.

6. F. é. m. des dynamos multipolaires.

a) ***F. é. m. moyenne induite dans un conducteur.*** — Soient :
$2p$ le nombre de pôles de la machine,
N le nombre total des conducteurs de l'induit,
n le nombre de tours de l'induit par seconde,
Φ le flux d'un pôle exprimé en *wébers*.

Un conducteur fait un tour avec l'induit en $1/n$ *seconde* et coupe le flux sous un pôle $2p$ fois par tour, soit un flux total $2p\Phi$; la f. é. m. moyenne induite dans ce conducteur est :

$$e = 2p\Phi : \frac{1}{n} = 2pn\Phi \text{ volts.}$$

La f. é. m. totale de la machine dépend du type d'enroulement.

b) ***F. é. m. dans le cas d'un enroulement en parallèle.*** — La machine possède alors $2p$ lignes de balais. Entre deux lignes de balais de noms contraires, il y a $N : 2p$ conducteurs en série. La f. é. m. totale est donc :

$$\boldsymbol{E} = e \times \frac{N}{2p} = 2pn\Phi \times \frac{N}{2p} = \boldsymbol{nN\Phi} \text{ volts.}$$

c) ***F. é. m. dans le cas d'un enroulement série simple.*** — Il y a 2 lignes de balais, donc $N : 2$ conducteurs en série; la f. é. m. totale est :

$$\boldsymbol{E} = e \times \frac{N}{2} = 2pn\Phi \times \frac{N}{2} = \boldsymbol{pnN\Phi} \text{ volts.}$$

7. Excitation et fonctionnement en charge des dynamos multipolaires.

L'excitation peut être indépendante, en série, en dérivation ou composée. Les propriétés qui en résultent sont celles des dynamos bipolaires de même excitation.

En charge, le courant débité produit une chute de la tension aux bornes due à la chute ohmique dans l'induit et à la réaction magnétique de l'induit.

8. Pôles auxiliaires ou pôles de commutation.

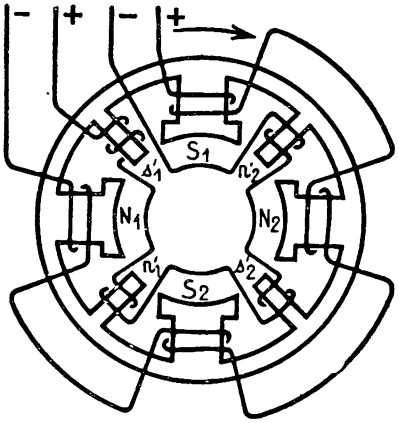


FIG. 7. — Inducteur de dynamo tétrapolaire avec **pôles auxiliaires.** Les pôles auxiliaires sont en série avec l'induit. Chaque pôle auxiliaire est de même nature que le pôle principal qui le précède dans le sens du mouvement de l'induit.

Ils ont pour rôle de compenser la réaction magnétique de l'induit.

Ce sont des pôles très étroits placés exactement au milieu de l'intervalle compris entre les pôles principaux et portant un bobinage à gros fil inséré dans le circuit de l'induit (fig. 7).

Leur rôle est de produire dans l'induit un flux de sens contraire à celui qu'y crée le courant débité. Dans une génératrice, un pôle auxiliaire doit avoir la même polarité que le pôle principal qui le précède dans le sens du mouvement de l'induit.

Toutes les dynamos modernes, bipolaires ou multipolaires, de puissance supérieure à quelques kilowatts, sont munies de pôles de commutation.

La figure 8 représente une dynamo à six pôles démontée, les pôles auxiliaires sont visibles entre les pôles principaux.

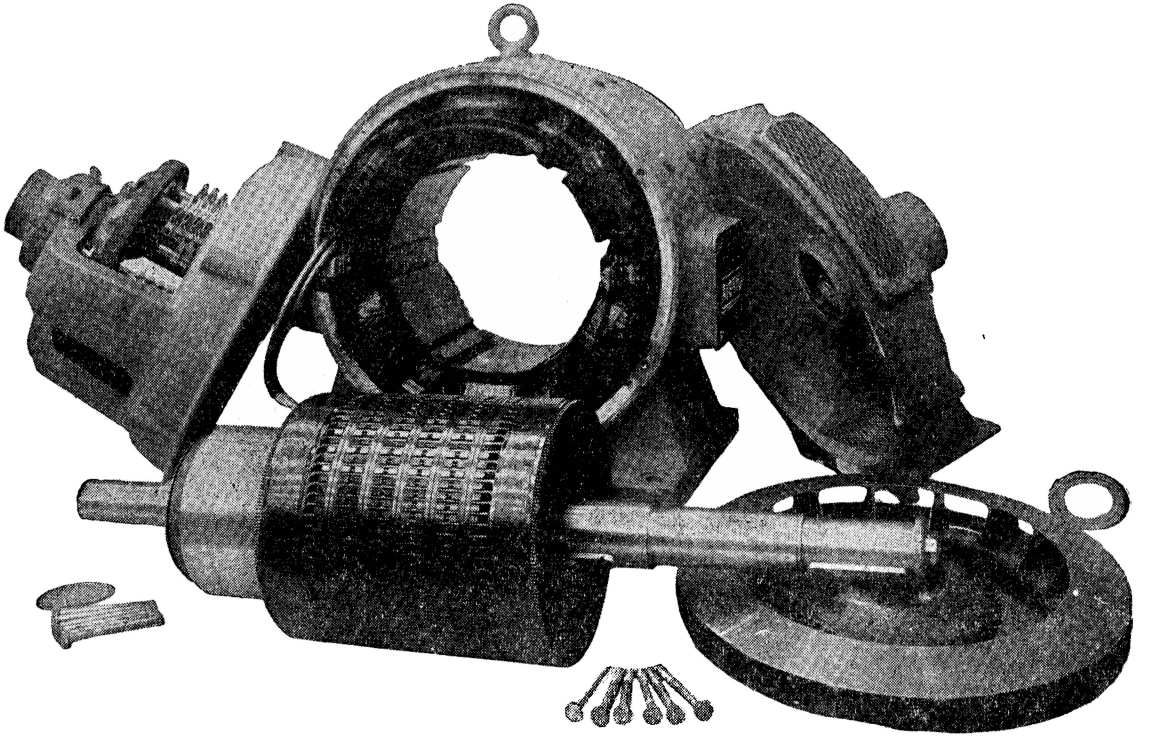
RÉSUMÉ

1. — Les dynamos multipolaires sont munies de plusieurs paires de pôles. Ce mode de construction est adopté pour toutes les machines puissantes.

2. — L'enroulement de l'induit est, soit *imbriqué*, soit *ondulé*. L'enroulement imbriqué est aussi nommé enroulement en *parallèle*. L'enroulement ondulé peut fournir un enroulement en *série*, un enroulement en parallèle ou un enroulement en série-parallèle.

3. — La f. é. m. d'une dynamo multipolaire dépend de son mode d'enroulement.

4. — Les dynamos modernes de moyenne et grande puissance sont munies de *pôles auxiliaires* qui compensent la réaction magnétique de l'induit.



Gliché Alsthom.

FIG. 8. — **Dynamo multipolaire** démontée. Au milieu, au premier plan, l'*induit* claveté sur son arbre; au second plan, l'*inducteur*. Remarquez les *pôles auxiliaires* entre les pôles principaux.

EXERCICES

1. L'enroulement de la dynamo bipolaire étudiée dans la 25e leçon est-il du type imbriqué ou du type ondulé?

2. Calculer la f. é. m. d'une dynamo tétrapolaire tournant à 1 200 *t/mn*; chaque pôle produit un flux de 0,0116 wéber; le nombre des conducteurs de l'induit est 496 :
1° quand l'enroulement est imbriqué;
2° quand l'enroulement est ondulé série simple.

Réponses : 1° 115 *volts;* 2° 230 *volts.*

3. L'induit d'une dynamo à six pôles est bobiné en parallèle. Il comprend 450 conducteurs en cuivre de 3 *mm* de diamètre dont la longueur totale, y compris les connexions, est 180 *m.*
Chercher :
1° la densité du courant dans l'induit exprimée en ampères par millimètre carré quand la machine débite 127 *A ;*
2° la résistance de l'induit.

Réponses : 1° 3 A/mm^2; 2° 0,012 Ω.

4. Une dynamo compound à longue dérivation débite 140 *A* sous 220 *V.*
Les pertes en chaleur Joule sont :
dans l'enroulement shunt : 2% de la puissance utile;
— — série : 1,2% —
— l'induit : 2% —
On demande :
1° la puissance utile fournie par la dynamo;
2° les pertes Joule en watts dans l'enroulement shunt;
3° l'intensité du courant dans l'enroulement shunt;
4° la résistance de l'enroulement shunt;
5° l'intensité du courant dans l'induit et l'enroulement série;
6° la résistance de l'induit et celle de l'enroulement série;
7° la f. é. m. de la dynamo.
Réponses : 30,8 *k W;* — 616 *W;* — 2,8 *A;* — 78 Ω — 142,8 *A;* — 0,024 Ω; — 0,018 Ω; — 226 *V.*

7. MOTEURS A COURANT CONTINU

28e LEÇON

Moteur à excitation indépendante.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

La dynamo shunt, 115 volts, *qui a servi dans les leçons précédentes.*
Un rhéostat de démarrage.
Un rhéostat de champ.
Deux interrupteurs bipolaires.
Un voltmètre à cadre mobile, 150 volts.
Un tachymètre ou 1 *compte-tours avec* 1 *montre à secondes.*
Une dynamo shunt avec un rhéostat de charge.
Un ampèremètre 20 ampères.
Un conducteur mobile suspendu à une potence.
Un aimant en fer à cheval.

LEÇON

A. — Quelques expériences.

1. Les dynamos sont réversibles : elles peuvent servir de moteurs.

Par exemple, la petite machine que nous avons étudiée comme génératrice à excitation indépendante (25e leçon), puis comme génératrice shunt (26e leçon), sert aussi de moteur à courant continu.

Montage. — Installons la machine suivant le schéma de la figure 1 pour recevoir du courant d'une ligne à 115 *volts* dans l'inducteur et

dans l'induit. Un rhéostat de champ est en série avec l'inducteur, un rhéostat de démarrage en série avec l'induit.

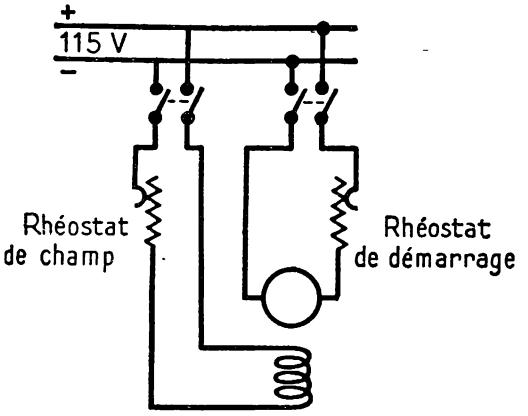


FIG. 1. — Schéma de branchement d'un **moteur à excitation indépendante.**

Expérience. — Le rhéostat de champ est hors circuit, le rhéostat de démarrage en série avec l'induit.

Fermons **d'abord** *l'interrupteur du circuit de l'inducteur*, puis celui de l'induit. L'induit démarre. Mettons lentement la résistance de démarrage hors circuit. La vitesse de rotation s'accélère et atteint environ 1 500 *tours par minute.*

La dynamo fonctionne comme moteur.

Nous l'arrêtons en coupant le courant *d'abord dans l'induit,* ensuite dans l'inducteur.

2. Changement du sens de rotation d'un moteur.

1° Inversons le sens du courant dans l'induit seulement : *le sens de rotation est changé.*

2° Inversons le sens du courant dans l'inducteur seulement : *le sens de rotation est changé.*

3° Inversons le sens du courant à la fois dans l'induit et dans l'inducteur : *le sens de rotation de la machine ne change pas.*

Donc : **pour inverser le sens de rotation d'un moteur à courant continu, on change le sens du courant soit dans l'induit seulement, soit dans l'inducteur seulement.**

3. Réglage de la vitesse de rotation du moteur.

1° Avec le rhéostat de champ, augmentons la résistance du circuit inducteur : *la vitesse du moteur croît.*

Diminuons la résistance du circuit inducteur : *le moteur ralentit.*

Donc : **la vitesse d'un moteur varie en sens inverse du flux inducteur.**

2° Avec le rhéostat de démarrage, ajoutons une résistance en série avec l'induit : *le moteur ralentit.*
Diminuons cette résistance : *la vitesse augmente.*

De ces deux moyens de régler la vitesse d'un moteur, on n'emploie que le premier : *la variation du flux inducteur.* La mise d'une résistance en série avec l'induit entraîne en effet une perte importante d'énergie dissipée en chaleur Joule.

4. Une force contre-électromotrice se produit dans l'induit quand le moteur tourne.

a) ***Expérience.*** — Branchons un voltmètre polarisé aux bornes de l'induit du moteur (fig. 2-*a*), que nous mettons en marche. Le voltmètre mesure la tension d'alimentation, soit 115 *volts.* Il indique aussi la polarité des balais et par conséquent le sens du courant dans l'induit.

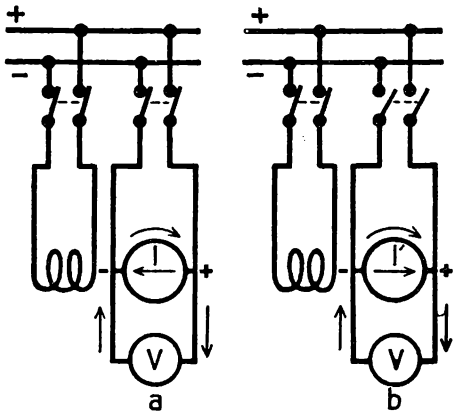


FIG. 2. — En *a*, le moteur fonctionne normalement; en *b*, le courant vient d'être coupé dans l'induit qui continue à tourner, mais de plus en plus lentement. Les flèches indiquent le sens du courant dans l'induit et le voltmètre.
A droite, le voltmètre montre la **force contre-électromotrice** engendrée dans l'induit quand il tourne.

Coupons le courant dans l'induit seulement (fig. 2-*b*). Le moteur continue à tourner pendant quelques secondes en ralentissant peu à peu. Tant que l'induit tourne, *le voltmètre dévie dans son sens primitif,* la tension qu'il indique diminue à mesure que la vitesse de l'induit décroît; elle était, par exemple, de 112 *volts* aussitôt après la coupure du courant, elle revient à zéro quand l'induit s'arrête.

b) ***Conclusions.*** — 1° La rotation de l'induit entre les pôles inducteurs produit une f. é. m.; la machine fonctionne en effet tout à fait comme une génératrice à excitation indépendante. D'après la polarité des balais, cette f. é. m. s'oppose à la tension d'alimentation du moteur, on lui donne le nom de **force contre-électromotrice.**
Puisque la f. c. é. m. du moteur et la f. é. m. de la machine fonction-

nant en génératrice sont même chose, la f. c. é. m. a pour valeur dans le cas d'un moteur bipolaire :

$$E' = n\,N\,\Phi$$

volts t/s conduc. webers

2° La comparaison des deux figures 2-*a* et 2-*b* montre que, *pour le même sens de rotation et le même sens du courant inducteur*, le sens des courants dans l'induit est différent quand la machine fonctionne comme moteur (en *a*) et lorsqu'elle fonctionne comme génératrice (en *b*).

En conséquence, *si les courants ont le même sens dans l'inducteur et dans l'induit d'une dynamo quand elle fonctionne en génératrice, puis en moteur, les sens de rotation sont inverses.*

B. — Équations générales de fonctionnement d'un moteur.

5. Voici quelques formules qui résument les propriétés d'un moteur.

1° ***Force contre-électromotrice.*** — Dans le cas d'un moteur bipolaire :

$$E' = n\,N\,\Phi. \qquad (1)$$

2° ***Tension aux bornes de l'induit.*** — L'induit absorbe I *ampères*, sa résistance est *r ohms*, il produit une f. c. é. m. E' *volts*, la tension aux balais est U *volts*, donc :

$$U = E' + r\,I \qquad (2)$$

3° ***Puissance électrique transformée en puissance mécanique.*** Multiplions par I tous les termes de la relation (2) :

$$UI = E'I + rI^2$$

UI est la puissance fournie à l'induit, rI^2 la perte en chaleur Joule, E'I est la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

On donne au rapport $\eta' = \dfrac{E'I}{UI} = \dfrac{E'}{U}$ le nom de *rendement électrique* de l'induit.

Remarquez qu'il y a d'autres pertes dans l'induit que les pertes en chaleur Joule : des pertes magnétiques (par hystérésis et courants de Foucault) et des

pertes mécaniques par frottements dans les paliers et dans l'air. Le *rendement industriel*, qui est le rapport entre la puissance mécanique utile P_u disponible à la poulie et la puissance électrique P_t fournie au moteur

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}$$

est un peu inférieur au rendement électrique; le rendement industriel a seul une importance pratique.

La relation (2) n'est qu'approchée.

4° ***Vitesse de l'induit.*** — En remplaçant E' par sa valeur dans la relation (2), on obtient :

$$U = nN\Phi + rI,$$

d'où

$$nN\Phi = U - rI$$

et

$$\boxed{n = \frac{U - rI}{N\Phi}}$$

Dans le cas d'un moteur à excitation indépendante fonctionnant sous tension constante, le flux inducteur Φ ne change pas; seul I croît avec la charge du moteur.

La relation (3), qui peut s'écrire :

$$n = \frac{U}{N\Phi} - \frac{rI}{N\Phi},$$

montre que *la vitesse décroît quand la charge augmente.* La perte de vitesse $\frac{rI}{N\Phi}$ est proportionnelle à l'intensité dans l'induit.

Nous pouvons vérifier cette diminution de vitesse du moteur quand sa charge augmente, en lui faisant entraîner une génératrice qui débite du courant

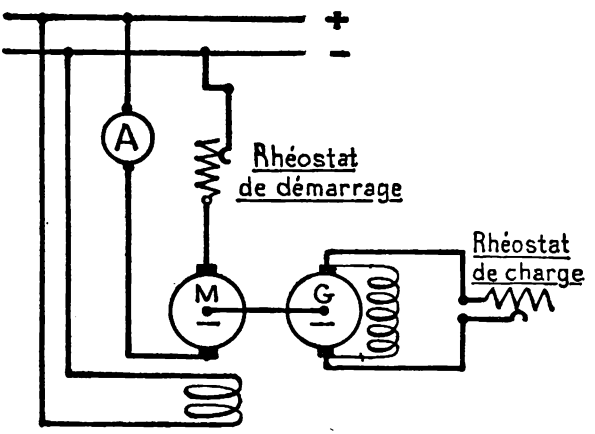


FIG. 3. — Schéma de montage d'un moteur à excitation indépendante en charge.

dans un rhéostat de charge (fig. 3). Nous mesurons quelques intensités absorbées par l'induit et les vitesses correspondantes. Nous trouvons :

Courant absorbé en ampères	1,2	4	9	15
Vitesse en tours par minute	1 620	1 580	1 518	1 440

La courbe de la vitesse en fonction de l'intensité absorbée tracée avec ces nombres se nomme **caractéristique de vitesse** du moteur (fig. 4).

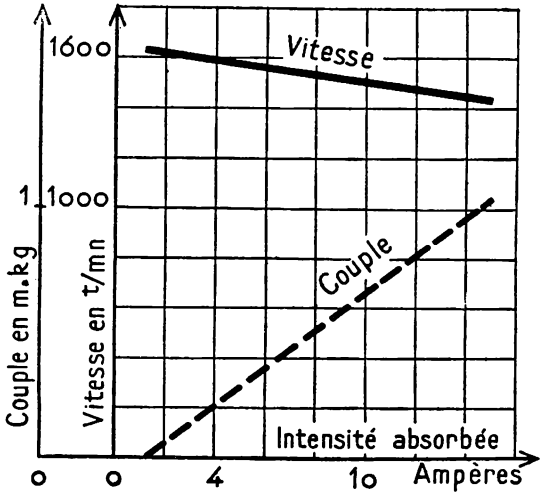


FIG. 4. — **Caractéristique de vitesse et de couple** d'un moteur à excitation indépendante.

5° ***Couple d'un moteur.*** — **Qu'est-ce que le couple d'un moteur?**

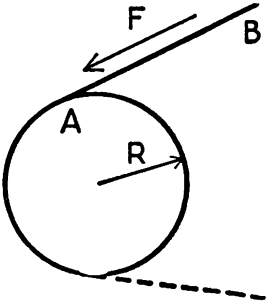


FIG. 5. — La poulie de rayon R*m* exerce une traction de F *kg. p* sur la courroie. Le **couple du moteur** est F × R *m. kg.*

Soit la poulie de rayon R *mètres* du moteur et F *kilogrammes-poids* la différence des forces que la poulie, en tournant, exerce sur les brins de la courroie[1] (fig. 5).

Le travail effectué par la poulie en 1 tour est :

$$A = 2\pi RF \text{ } kilogrammètres.$$

On donne au produit R × F le nom de **couple** du moteur, on le désigne par la lettre **C** et on l'exprime en *mètres-kilogrammes* (m/kgp).

Si dans la formule C = R × F on donne à R la valeur 1 mètre, on voit que le couple d'un moteur est exprimé par le même nombre que la force tangentielle

1. Les deux brins d'une courroie sont tendus, mais inégalement, la force F est égale à la différence des deux tensions.

F *kilogrammes-poids* que le moteur exercerait sur la jante de sa poulie si elle avait 1 *mètre* de rayon. Vous comprenez l'intérêt que présente, au point de vue mécanique, la connaissance du couple d'un moteur.

Si la poulie fait *n tours par seconde*, la puissance mécanique du moteur est $P = n\,A = 2\,\pi\,n\,C$ *kilogrammètres par seconde*, soit $P = 2\,\pi\,n\,C \times 9{,}81$ *watts*.

Calcul du couple d'un moteur. La puissance électrique que le moteur transforme en puissance mécanique est :

$$P = E'I = nN\Phi \times I$$

Donc $$n\,N\,\Phi\,I = 2\,\pi\,n\,C \times 9{,}81$$

et $$C = \frac{N}{9{,}81 \times 2\pi}\,\Phi.\,I \text{ } \textit{mètres-kilogrammes}$$

soit en représentant par k l'expression $\frac{N}{9{,}81 \times 2\pi}$ qui est constante

$$\boxed{C = k\,\Phi I} \qquad (4)$$

Dans un moteur à excitation indépendante où le flux est constant, le couple est proportionnel à l'intensité dans l'induit. Sa courbe se nomme **caractéristique de couple** du moteur (fig. 4).

Sur les deux caractéristiques de vitesse et de couple, on peut relever les valeurs du couple pour différentes vitesses et tracer la courbe du couple en fonction de la vitesse. C'est la **caractéristique mécanique** du moteur (fig. 6).

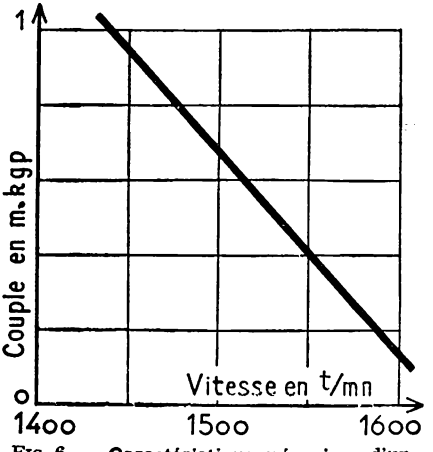


FIG. 6. — **Caractéristique mécanique d'un moteur à excitation indépendante.**

6. Nécessité d'un rhéostat pour le démarrage d'un moteur.

La tension U aux bornes de l'induit et l'intensité I absorbée dans un moteur *en marche* sont liées par la relation :

$$U = E' + rI.$$

Quand l'induit est *arrêté*, il n'y a pas de f. c. é. m. La tension U mise directement aux bornes de l'induit de résistance r produirait un courant $I' = U : r$. La résistance r est faible et l'intensité I', trop considérable, détériorerait l'induit.

Par exemple, dans la dynamo dont nous nous servons, $r = 0{,}9$ *ohms*, pour $U = 115$ *volts*, l'intensité I' attendrait 127 *ampères* dans l'induit, soit 9 fois l'intensité de pleine charge.

On limite le courant au démarrage en mettant en série avec l'induit un rhéostat de résistance R; au *décollage*, c'est-à-dire à l'instant où l'induit commence à peine à tourner, la pointe de courant I_d a pour valeur :

$$I_d = \frac{U}{R + r}.$$

Dès que l'induit tourne, il produit une f. c. é. m. E' opposée à U, le courant absorbé diminue; on sort alors peu à peu le rhéostat du circuit; le démarrage est terminé quand le rhéostat de démarrage est éliminé.

Ainsi, le petit moteur employé dans la leçon absorbe 14 *ampères* à pleine charge sous 115 *volts*, sa résistance d'induit est 0,9 *ohm*. On se propose de limiter son courant de démarrage à $14 \times 2 = 28$ *ampères*. La résistance R du rhéostat doit être telle que

$$I_d = \frac{U}{R + r}, \text{ soit } 28 = \frac{115}{R + 0{,}9}$$

d'où $R + 0{,}9 = 115 : 28 = 4{,}1$ *ohms*

et $R = 3{,}2$ *ohms*.

4 plots au rhéostat, en plus du plot mort, suffiront.

Remarques. — 1° La pointe de courant au décollage ne dépend que de la tension et de la résistance totale de l'induit et du rhéostat. **Elle est donc la même en charge qu'à vide.**

Mais en charge le démarrage dure plus longtemps qu'à vide, c'est pourquoi la chaleur Joule dégagée est plus abondante.

2° Insistons sur la nécessité de **manœuvrer lentement** au démarrage la manette du rhéostat pour laisser le temps au moteur d'accélérer sa vitesse. Pour arrêter le moteur, au contraire, **ramener rapidement** le rhéostat à sa position de repos pour bénéficier de la f. c. é. m. qui réduit le courant à couper.

7. Précautions à prendre avec le rhéostat de champ

1° Un moteur démarre mieux si son couple est grand. La formule $C = k\Phi I$ indique que le flux inducteur au démarrage doit être aussi

grand que possible. Il faut donc mettre hors circuit la résistance du rhéostat de champ.

2° L'examen de la formule de la vitesse d'un moteur

$$n = \frac{U - r\,I}{N\Phi}$$

explique l'un ou l'autre des accidents suivants qui se produisent *si le circuit inducteur est coupé alors que l'induit reste sous la tension du réseau :*

a) *Quand le moteur est à vide ou peu chargé,* Φ s'annulant, la vitesse de l'induit devient extrêmement grande, la force centrifuge arrache l'enroulement et détruit le moteur;

b) *Quand la charge du moteur ralentit son emballement,* le courant absorbé croît très vite, à cause de la suppression de la f. c. é. m., et l'induit est brûlé.

Donc, d'une part, prendre des précautions pour que le circuit inducteur ne soit pas coupé tant que l'induit est sous tension, en protégeant les conducteurs sous un tube, en ne mettant pas de coupe-circuit fusibles dans le circuit inducteur, en n'employant qu'un rhéostat de champ sans plot mort; d'autre part, munir le circuit de l'induit de fusibles ou mieux d'un disjoncteur à maximum d'intensité.

C. — Explication de la rotation de l'induit d'un moteur.

8. Expériences préliminaires.

Rendons mobile, comme une barre de balançoire, un conducteur BC en le suspendant, par deux galons métalliques souples ou deux longs fils terminés par des crochets, à deux tiges A et D qui amènent le courant (fig. 7). Disposons un aimant permanent en fer à cheval pour que BC soit perpendiculaire au flux vertical entre les pôles.

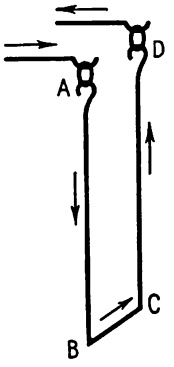


FIG. 7. — Le conducteur BC est mobile autour de la charnière AD.

Quand un courant

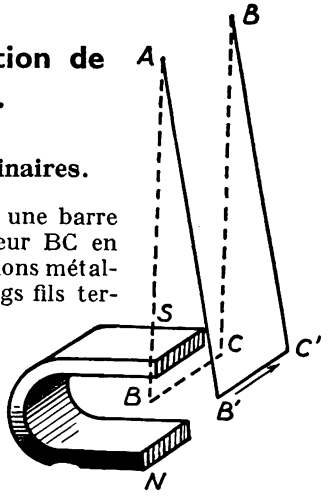


FIG. 8. — Quand le courant passe dans le sens BC, le conducteur se déplace en B'C'.

passe dans le sens BC, *le conducteur se déplace en B'C'* (fig. 8).

Renversons le sens du courant : *le courant se déplace en sens contraire.*

Retournons l'aimant en mettant le pôle nord à la place du pôle sud pour inverser le sens du flux et recommençons les deux expériences précédentes : *le sens de déplacement du conducteur est changé.*

Donc *quand un flux magnétique et un courant sont perpendiculaires,* une **force électromagnétique** *tend à déplacer le courant en lui faisant faucher le flux.*

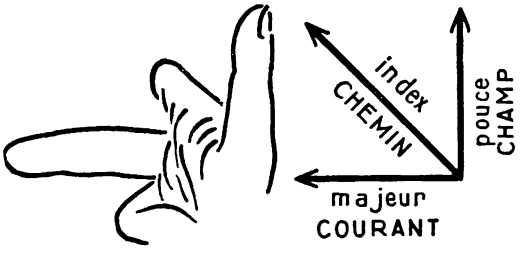


FIG. 9. — La règle des trois doigts de la **main droite** est un moyen de trouver le sens de la force électromagnétique.

La règle des trois doigts de la main droite indique le sens de cette force électromagnétique.

Le pouce, l'index et le majeur de la **main droite** *sont disposés comme les arêtes d'un cube aboutissant au même sommet* (fig. 9). *On place le* **pouce** *dans la direction et le sens du* CHAMP, *le* **majeur** *dans la direction et le sens du* COURANT, *l'***index** *indique la direction et le sens de la force électromagnétique.*

Main Droite, parce qu'il s'agit de Démarrer un conducteur.

pouce,	**index,**	**majeur**	(ordre naturel des doigts).
CHAMP,	CHEMIN	COURANT	(ordre alphabétique).

9. Application à l'induit et l'inducteur d'un moteur.

Le courant I, amené aux balais d'un moteur bipolaire, se partage entre les deux moitiés de l'enroulement qui sont couplées en parallèle. Un courant I : 2 traverse chaque conducteur et le courant va, par exemple, de l'avant vers l'arrière dans le conducteur C choisi à gauche de l'induit (fig. 10), de l'arrière vers l'avant dans le conducteur de droite couplé en série avec C. En somme, tous les conducteurs de gauche sont parcourus par un courant d'un certain sens, tous ceux de droite par un courant de sens contraire.

Entre le flux sous le pôle nord et le conducteur C s'exerce une force électromagnétique qui pousse le conducteur dans le sens de la flèche 1.

En appliquant la règle des trois doigts à un conducteur tel que C' pris dans la moitié droite de l'induit, nous constatons que la force électromagnétique qui agit sur ce conducteur a le sens de la flèche 2.

Tous les conducteurs de l'induit sont ainsi poussés dans le même sens et l'induit tourne.

La rotation ne modifie pas le flux inducteur et ne change pas la répartition du courant dans les conducteurs, les forces électromagnétiques continuent d'agir et l'induit de tourner.

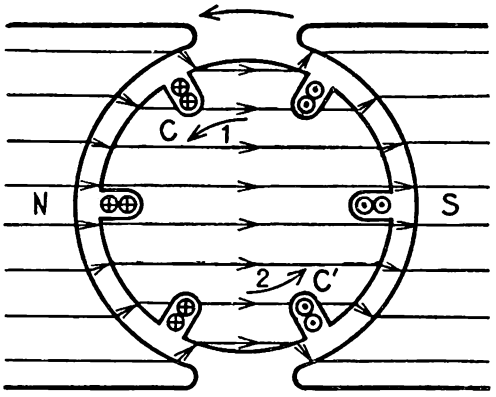


FIG. 10 — Schéma de l'**induit d'un moteur bipolaire.** Les forces électromagnétiques font tourner l'induit dans le sens des flèches 1 et 2.

10. Conclusion.

Dans une dynamo en rotation, qu'elle soit génératrice ou moteur, il existe :

1° une **f. é. m.**, qui produit le courant quand la machine est génératrice, qui s'oppose à la tension extérieure quand la machine est motrice;

2° des **forces électromagnétiques** appliquées aux conducteurs de l'induit. Ces forces produisent un *travail moteur* quand de l'énergie électrique est fournie à la machine, un *travail résistant* quand la dynamo est entraînée par un moteur.

La transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, et inversement, la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, s'effectuent par les mêmes phénomènes électromagnétiques.

RÉSUMÉ

1. — Quand on fournit du courant à une dynamo, l'induit tourne, la machine est un moteur.

On change le sens de rotation d'un moteur à courant continu en inversant le courant soit dans l'induit, soit dans l'inducteur.

Le moteur tourne plus vite si l'on diminue le courant inducteur, il ralentit si l'on augmente ce courant.

2. — Quand un moteur tourne, il se produit dans l'induit une f. c. é. m. qui s'oppose à la tension appliquée aux balais et limite le courant absorbé.

3. — Les relations suivantes résument les propriétés d'un moteur bipolaire à courant continu.

$$E' = n\,N\,\Phi$$
$$U = E' + r\,I$$
$$n = \frac{U - r\,I}{N\Phi}$$
$$C = k\,\Phi I$$

4. — Un rhéostat de démarrage est nécessaire pour démarrer un moteur sans le détériorer.

Jamais le circuit inducteur ne doit être coupé quand l'induit est sous tension.

5. — La rotation de l'induit d'un moteur s'explique par l'action de forces électromagnétiques entre le flux dans l'entrefer de la machine et les courants dans les conducteurs de l'induit.

EXERCICES

1. En quoi un rhéostat de champ diffère-t-il d'un rhéostat de démarrage?

2. Un rhéostat de démarrage quelconque peut il servir pour n'importe quel moteur à courant continu?

3. Un moteur à courant continu absorbe à pleine charge 13,6 A sous 220 V. Sa résistance d'induit est 0,84 Ω. Quelle doit être la résistance du rhéostat de démarrage pour que le courant au décollage ne dépasse pas 1,5 fois le courant en charge normale?

Réponse : 9,9 *ohms.*

4. Un moteur à 115 V absorbe à vide 1,5 A. La résistance de l'induit est 0,9 Ω. Calculer sa f. c. é. m.

Que devient cette f. c. é. m. quand le moteur est en charge et absorbe 14 A?

Réponses : 1° 114 *V;* 2° 102,4 *V.*

5. Un moteur tournant à 1 200 *t/mn* fournit à sa poulie une puissance de 15 *chevaux.* Calculer son couple.

Réponse : 8,5 *mètres-kilogrammes.*

6. La résistance d'induit d'une dynamo est 0,9 Ω.

Fonctionnant en génératrice à 1 600 *t/mn.* la machine débite 18 A et la tension à ses bornes est 114 V. Quelle est sa f. é. m. ?

On la fait tourner en moteur sans modifier son excitation en appliquant 114 V à ses bornes. Elle absorbe 18 A. Quelle est sa f. c. é. m.? Quelle est sa vitesse?

On néglige la réaction d'induit.

Réponses : 1° 130,2 *volts;* 2° 97,8 *volts;* 3° 1 200 *t/mn.*

Les moteurs shunt, série et compound.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Les expériences à faire au cours de la leçon peuvent se limiter à celles qui concernent le moteur shunt.

Le matériel nécessaire est celui qui a été employé dans les leçons précédentes, savoir

Une dynamo shunt 115 volts, 1 800 watts.
Un rhéostat de démarrage.
Un rhéostat de champ.
Un interrupteur bipolaire.
Un voltmètre 150 volts.
Un ampèremètre 20 ampères.
Un tachymètre ou 1 *compte-tours avec* 1 *montre à secondes.*
Une dynamo shunt avec rhéostat de charge.

LEÇON

Les dynamos shunt, série et compound sont utilisées comme moteurs. Ces moteurs ont des propriétés différentes et, par conséquent, ne sont pas propres aux mêmes usages.

A. — Moteurs shunt.

1. Montage d'un moteur shunt.

On monte un moteur shunt sur une distribution de courant continu suivant le schéma de la figure 1.

Remarquez que **le rhéostat de démarrage** (fig. 1) est construit pour mettre dès le premier plot la tension de la ligne directement sur l'inducteur et que les résistances de démarrage sont en série avec l'induit seulement. Le moteur démarre ainsi, comme il convient, au maximum d'excitation.

Vous constatez aussi que le circuit inducteur est toujours fermé sur

le circuit de l'induit pour éviter, à la coupure du courant, des étincelles dues à la self-induction des bobines inductrices. Un tel rhéostat est dit *anti-inductif*.

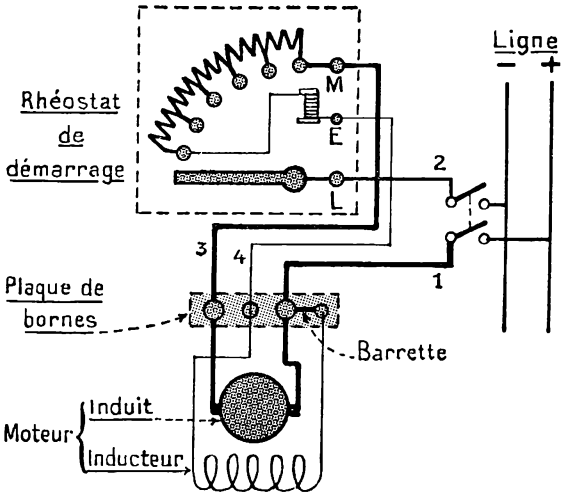


FIG. 1. — Schéma d'**installation d'un moteur shunt.** Le monteur-électricien a seulement à mettre en place les quatre fils 1, 2, 3, 4.

Pour mettre le moteur en marche, on tourne **lentement** la manette du rhéostat de gauche à droite jusqu'au dernier plot.

Pour l'arrêter, on ouvre l'interrupteur de ligne et l'on ramène la manette du rhéostat à sa position de repos. Les deux manœuvres peuvent être inversées : on ramène **brusquement** la manette du rhéostat à sa position de repos, puis on ouvre l'interrupteur de ligne.

Le moteur est protégé, d'une part, par *le disjoncteur à minimum d'excitation* du rhéostat, d'autre part, par des coupe-circuit fusibles sur les fils de ligne. Quelquefois ces fusibles sont remplacés par *un disjoncteur à maximum d'intensité* placé sur le rhéostat (fig. 3).

Vous voyez qu'un moteur shunt ne diffère guère d'un moteur à excitation indépendante. Dans un moteur shunt, les tensions aux bornes de l'inducteur et aux bornes de l'induit sont égales; dans un moteur à excitation indé-

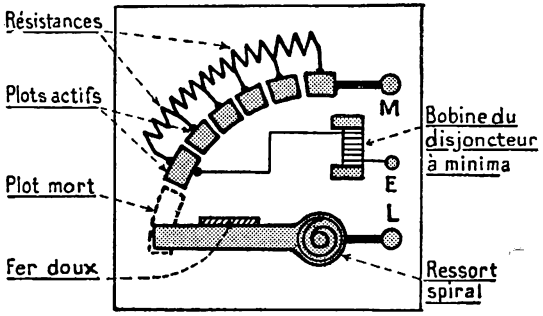


FIG. 2. — **Rhéostat de démarrage** pour moteur **shunt. Le ressort tend à ramener la manette sur le plot mort.**

pendante, elles peuvent être très différentes. Les propriétés des deux sortes de moteurs sont presque les mêmes.

2. Changement du sens de rotation.

La figure 4 indique comment on le réalise en intervertissant les connexions de l'inducteur à la plaque de bornes du moteur.

3. La vitesse de rotation diminue un peu quand la charge du moteur shunt croît.

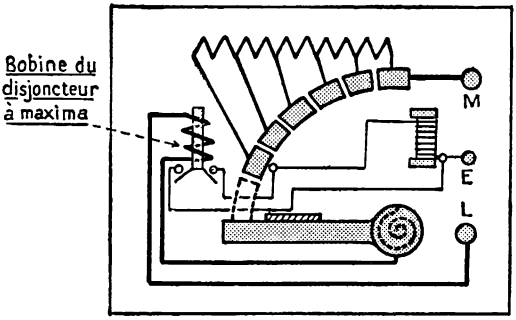


FIG. 3. — Rhéostat de démarrage avec **disjoncteur à maximum d'intensité.** Expliquez son fonctionnement.

Expérience. — Chargeons le moteur en lui faisant entraîner une génératrice qui débite dans un rhéostat de charge (fig. 5).

Mesurons les vitesses obtenues pour différentes intensités I_t absorbées

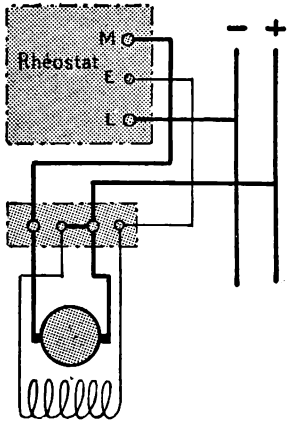


FIG. 4 — Changement du **sens de rotation** d'un moteur shunt. Il suffit de déplacer la barrette et la connexion du fil venant de la borne E du rhéostat.

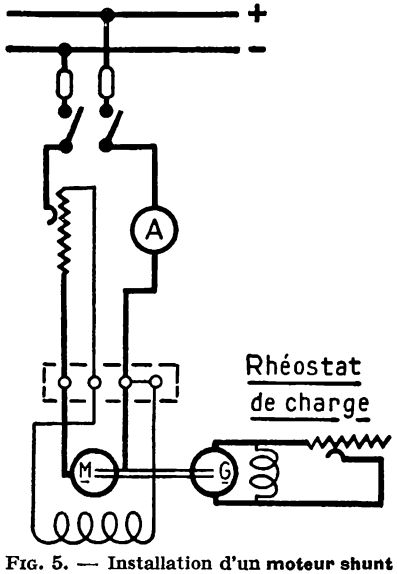


FIG. 5. — Installation d'un **moteur shunt en charge.**

par le moteur sous la tension constante 115 *volts* (I_t est la somme de l'intensité I dans l'induit et de l'intensité *i* dans l'inducteur). Nous obtenons :

I_t *ampères*	2,2	5	10	16
n t/mn	1 620	1 580	1 518	1 440

La vitesse diminue quand la charge croît.

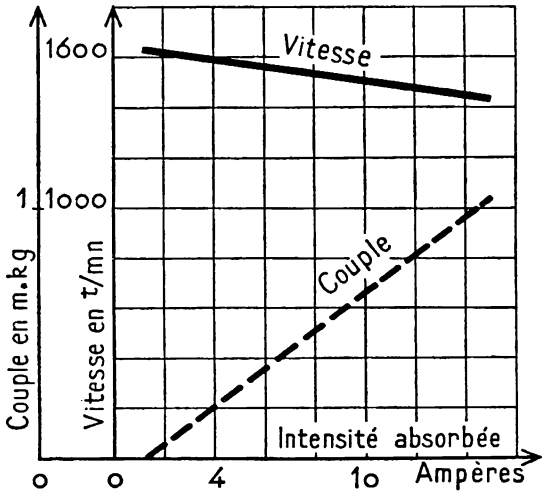


FIG. 6. — **Caractéristiques de vitesse et de couple** d'un moteur shunt.

La caractéristique de vitesse du moteur shunt (fig. 6) est tout à fait semblable à celle d'un moteur à excitation indépendante.

4. Réglage de la vitesse d'un moteur shunt.

a) La différence de vitesse à vide et en charge est de 11 % pour notre petit moteur. Elle ne dépasse pas 6 à 8 % pour les moteurs shunt de moyenne et grande puissance. *Elle est sans importance dans la plupart des emplois de ces moteurs.*

b) Si une vitesse précise est nécessaire, on la règle par un rhéostat de champ inséré dans le circuit inducteur.

La variation de vitesse obtenue par l'inducteur est de 1 à 2 dans le cas des moteurs ordinaires. Elle va de 1 à 5 pour les moteurs shunt spécialement construits et munis de pôles auxiliaires.

c) Pour éviter le démarrage accidentel à champ inducteur réduit, on incorpore quelquefois le rhéostat de champ au rhéostat de démarrage (fig. 7).

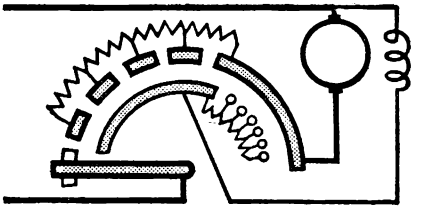


FIG. 7. — Schéma d'un rhéostat de démarrage auquel est incorporé un **rhéostat de champ.**

d) *Conclusion.* — **Une propriété importante des moteurs shunt est d'avoir une vitesse pratiquement constante et, de plus, facilement réglable.**

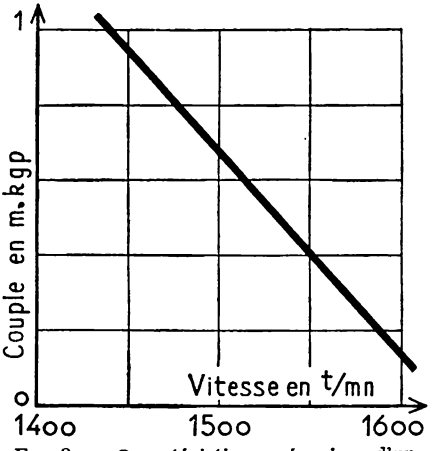


FIG. 8. — **Caractéristique mécanique** d'un moteur shunt.

5. Le couple d'un moteur shunt est proportionnel au courant I dans l'induit.

Dans un moteur shunt alimenté à tension constante, le flux inducteur Φ est constant.

Donc le couple

$$C = k\Phi I$$

est *proportionnel au courant I dans l'induit.*

La **caractéristique de couple** traduit graphiquement cette propriété : c'est une droite (fig. 6).

Le graphique du couple en fonction de la vitesse, **caractéristique mécanique** du moteur, est aussi une droite (fig. 8).

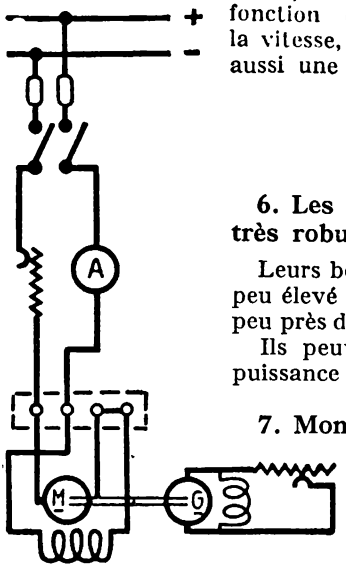


FIG. 9. — Schéma d'installation d'un **moteur série.**

B. — Moteurs série.

6. Les moteurs série sont de construction très robuste.

Leurs bobines inductrices sont faites d'un nombre peu élevé de spires de gros fil, dont la section est à peu près double de celle du fil de l'induit.

Ils peuvent fournir pendant quelque temps une puissance bien supérieure à leur puissance normale.

7. Montage d'un moteur série.

Le rhéostat de démarrage est monté en série avec l'inducteur et l'induit (fig. 9).

Les moteurs série, quand ils ne sont pas tout petits, sont toujours accouplés par manchonnage, par engrenages ou par chaînes, avec les machines qu'ils

entraînent. Cet accouplement **positif** évite que le moteur tourne à vide. **Jamais un moteur série ne doit pouvoir tourner à vide.** La raison de cette règle de sécurité est donnée au paragraphe 9.

On démarre et l'on arrête un moteur série comme un moteur shunt.

8. Changement du sens de rotation.

On inverse le sens de rotation en changeant le sens du courant soit dans l'inducteur, soit dans l'induit (fig. 10).

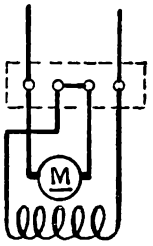


FIG. 10. — Changement du **sens de rotation** d'un moteur série. Le sens du courant est inversé dans l'inducteur.

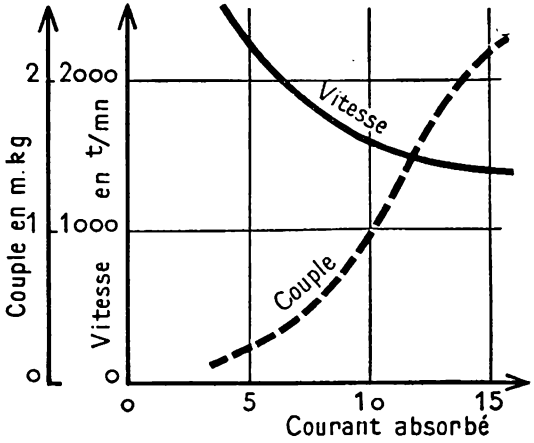


FIG. 11. — **Caractéristiques de vitesse et de couple** d'un moteur série.

9. La vitesse d'un moteur série varie beaucoup avec la charge.

a) Un moteur série de 4 *chevaux*, 220 *volts*, tourne à 2 430 *tours par minute* quand il absorbe 4 *ampères* et à 1 410 *tours par minute* quand il absorbe 14 *ampères*. La figure 11 représente cette variation de vitesse.

b) Pour appliquer la formule de la vitesse d'un moteur à courant continu

$$n = \frac{U - r\,I}{N\Phi}$$

à un moteur série, considérons deux cas :

1° ***à faible charge.*** — Le terme rI, qui représente la chute de tension dans le moteur, est faible par rapport à la tension aux bornes U, négligeons-le :

$$n \simeq \frac{U}{N\Phi}.$$

Le courant d'alimentation I est le courant inducteur, il est peu intense, le flux inducteur est à peu près proportionnel à I :

$$\Phi = k' I$$

Donc $$n \simeq \frac{U}{N k' I}.$$

La vitesse est inversement proportionnelle au courant I.

Si le moteur tourne à vide, I est faible et la vitesse n très grande. **Un moteur série s'emballe à vide.**

Quand la charge augmente, I croît et la vitesse diminue rapidement.

2° ***à forte charge.*** — Le courant inducteur est grand, le circuit magnétique est saturé, le flux inducteur Φ n'augmente plus que lentement quand I croît. Le moteur série tend à se comporter comme un moteur shunt à flux constant, sa vitesse diminue lentement quand la charge déjà élevée continue à croître (fig. 11).

Vous retiendrez surtout qu'*il y a danger à employer un moteur série dans des conditions telles qu'il risque de tourner à vide.*

c) ***Réglage de la vitesse d'un moteur série.*** — Pour *diminuer la vitesse,* on met en série un rhéostat avec le moteur, ce qui revient à réduire la tension U entre les balais.

Pour *augmenter la vitesse,* on place un rhéostat ou une résistance en dérivation aux bornes des bobines inductrices pour diminuer le courant inducteur et affaiblir le flux.

10. Couple d'un moteur série.

a) ***A faible charge,*** on peut remplacer Φ par k'I dans la formule

$$C = k\Phi I$$

qui devient

$$C = kk' I^2$$

et montre que **le couple est proportionnel au carré de l'intensité absorbée.**

b) ***A charge élevée,*** le flux Φ croît lentement quand le courant augmente, et *le couple tend à devenir proportionnel à l'intensité.*

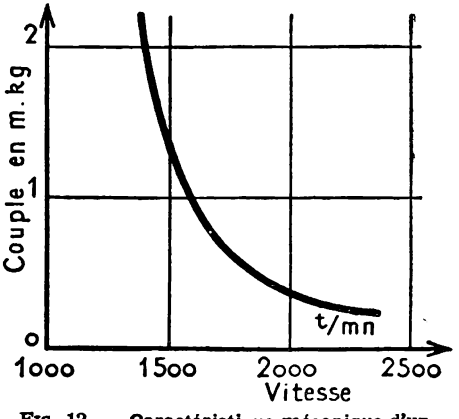


FIG. 12. — Caractéristique mécanique d'un moteur série.

La variation du couple en

fonction du courant absorbé est indiquée en fonction de la vitesse par la figure 12.

Pendant la durée de son démarrage, un moteur série peut supporter un courant intense, le circuit magnétique est saturé; à cause des valeurs élevées de Φ et de I, le couple atteint une grande valeur.

C. — Moteurs compound.

11. Montage d'un moteur compound.

Vous savez qu'une dynamo à excitation composée possède deux

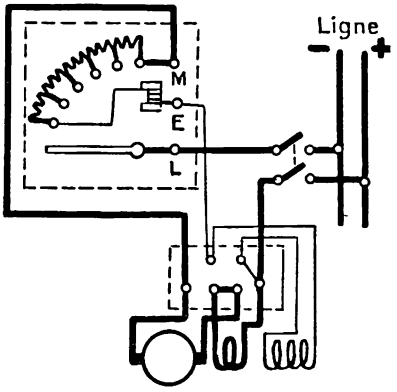


FIG. 13. — Installation d'un **moteur compound.**

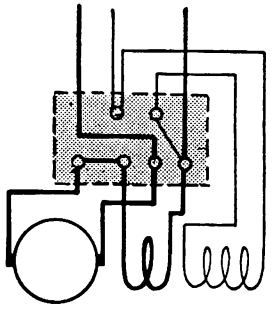


FIG. 14. — Changement de **sens de rotation** d'un moteur compound. Le sens du courant est inversé dans l'induit.

enroulements inducteurs; l'un, le plus important, est en dérivation; l'autre, de peu de spires, est en série avec l'induit.

La dynamo se monte en moteur comme un moteur shunt, avec un rhéostat identique (fig. 13). Les connexions à la plaque de bornes sont le plus souvent effectuées pour que les deux enroulements inducteurs produisent des flux de même sens. On dit que le moteur est à *flux additionnels.* Quand les flux sont de sens différents, le moteur est à *flux différentiels.*

Pour changer le sens de rotation d'un moteur compound, on inverse le sens du courant dans l'induit seulement (fig. 14).

12. Propriétés d'un moteur compound à flux additionnels.

A cause de l'enroulement shunt, un moteur compound ne s'emballe pas à vide; mais parce que l'enroulement série renforce le flux inducteur en charge, la vitesse d'un moteur compound diminue plus en charge que celle d'un moteur shunt (fig. 15).

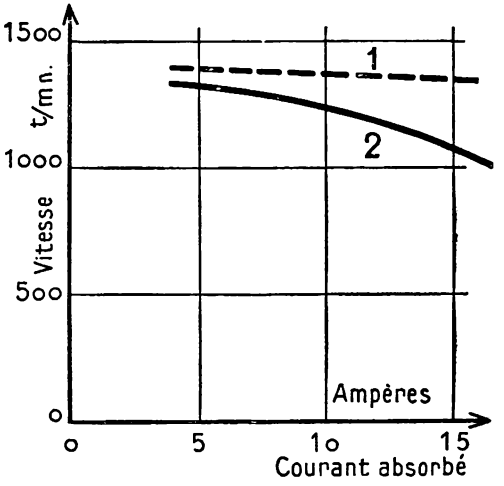


FIG. 15. — **Caractéristique de vitesse** d'un moteur compound à flux additionnels. 1 avec l'enroulement shunt seul; 2 avec les deux enroulements inducteurs.

A cause de la surintensité au démarrage, l'enroulement série augmente beaucoup le flux et ralentit la vitesse du moteur. Le couple de démarrage est plus élevé que celui d'un moteur shunt. Un moteur compound démarre mieux en charge qu'un moteur shunt de même puissance.

13. Moteurs compound à flux différentiels.

L'enroulement série peut être déterminé pour compenser la perte de vitesse en charge du moteur fonctionnant avec l'enroulement shunt seul. On obtient ainsi un moteur à vitesse constante.

Mais l'enroulement série diminue le flux au démarrage et il convient de ne démarrer le moteur qu'à vide.

Les moteurs compound à flux différentiels sont peu employés.

D. — Choix d'un moteur à courant continu pour un service déterminé.

14. Ce sont les caractéristiques de vitesse et de couple qui fixent le choix du type de moteur convenant à un emploi déterminé.

a) ***Moteurs à excitation indépendante.*** — La séparation complète des deux circuits d'inducteur et d'induit donne à ces moteurs une grande souplesse, mais complique leur installation. On ne les emploie

que pour des puissances de plusieurs centaines de chevaux, par exemple pour la commande des laminoirs, la manœuvre des cages d'extraction dans les mines.

Souvent leur excitation est constante. On applique aux bornes de l'induit une tension dont le sens peut changer, dont la valeur est réglable. Cette tension est fournie par une génératrice qui est aussi à excitation indépendante et variable à volonté. On obtient ainsi une vitesse qui est réglable dans de très grandes limites, dans l'un ou l'autre sens de rotation.

b) ***Moteurs shunt.*** — Leur vitesse est pratiquement constante et réglable, leur couple est de valeur moyenne tant au démarrage qu'en marche normale. Ils servent pour la commande de machines-outils, de pompes centrifuges, de tous appareils dont le couple de démarrage est relativement faible. Certains ont une puissance de plusieurs milliers de chevaux.

c) ***Moteurs compound.*** — Leur vitesse diminue quand la charge augmente, mais est facilement réglable; leur couple au démarrage est élevé. Ils conviennent pour entraîner des compresseurs, des pompes alternatives, des appareils démarrant en charge avec un couple important.

d) ***Moteurs série.*** — Leur vitesse est très variable, leur couple de démarrage est grand. Ce sont des moteurs de traction pour les tramways, les locomotives et les camions électriques, les tracteurs de bateaux, les appareils de levage.

On ne les emploie pas quand ils risquent de fonctionner à vide ou à charge réduite. On en construit jusqu'à une puissance de quelques centaines de chevaux.

RÉSUMÉ

1. — Les moteurs excités en dérivation ou *moteurs shunt* ont une vitesse pratiquement constante quand la charge varie. On ajuste cette vitesse à la valeur désirée avec un rhéostat de champ.
Le couple d'un moteur shunt est proportionnel au courant dans l'induit.
Les moteurs shunt sont très employés.

2. — Les *moteurs série* s'emballent à vide et ralentissent beaucoup en charge.
Au démarrage leur couple est élevé.
Ce sont des moteurs de traction et de levage.

3. — Les *moteurs compound* à flux additionnels ont un couple de démarrage supérieur à celui des moteurs shunt, mais leur vitesse baisse en charge
Ils conviennent pour la commande des appareils à grande inertie et dans le cas d'installations où les démarrages sont fréquents.

EXERCICES

1. Un moteur série convient-il pour entraîner une scie circulaire à bois? Justifier la réponse.

2. Quel est le type de moteur qui convient pour commander un ascenseur?

3. On dispose d'un moteur de 4 *chevaux*, 230 *V*, 1 200 *t/mn.* Est-il possible de l'employer sous 115 *V?* Quelles seraient alors sa vitesse et sa puissance?

4. On dispose d'un moteur à 115 *V.* Est-il possible de l'employer sous la tension de 230 *V?* Justifier la réponse.

5. Le rhéostat de démarrage d'un moteur shunt est relié à la plaque de bornes du moteur suivant le schéma de la figure 16.

Le moteur ne démarre pas et, si l'on insiste, les fusibles fondent. Expliquer ces faits. Faire un schéma de montage correct.

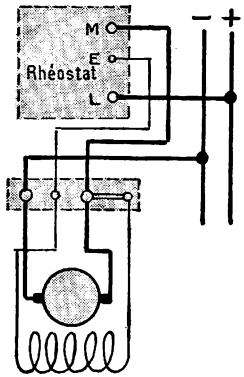


FIG. 16. — Montage **défectueux** d'un moteur shunt.

6. Un moteur shunt est alimenté sous la tension constante de 115 *V.* Sa résistance d'induit est 0,5 Ω. L'induit absorbe 20 *A* et tourne à 900 *t/mn.*

Quelle est la vitesse du moteur quand l'induit absorbe 40 *A?*

Réponse : 814 *t/mn.*

7. Un moteur shunt bipolaire à 110 *V* dont l'induit a une résistance entre balais de 0,1 Ω est muni d'un rhéostat de démarrage dont la résistance est 2,4Ω.

Calculer la pointe de courant de démarrage quand le moteur entraîne une machine qui exige à vitesse normale une puissance de 4 *kW.*

Réponse : 44 *ampères.*

Rendement et couplage des machines à courant continu.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une seule expérience est prévue au cours de cette leçon : le réglage des balais d'une machine à courant continu. Elle nécessite :
La dynamo shunt précédemment étudiée.
Une batterie de trois éléments d'accumulateurs.
Un voltmètre à plusieurs sensibilités.
Un interrupteur bipolaire.
La résistance de l'induit de la dynamo étant voisine de 1 ohm, *la batterie sera branchée directement sur l'induit sans rhéostat.*

LEÇON

A. — Rendement d'une génératrice ou d'un moteur.

1. Définition du rendement (industriel).

a) Une dynamo génératrice *reçoit* sur son arbre une puissance mécanique P_t; elle *produit* dans le circuit sur lequel elle débite une puissance électrique utile P_u.

Son rendement (industriel) est le rapport entre la puissance utile qu'elle produit et la puissance qui lui est fournie :

$$\eta = \frac{\textit{Puissance électrique utile}}{\textit{Puissance mécanique reçue}} = \frac{P_u}{P_t}.$$

b) Un moteur électrique *reçoit* du réseau une puissance électrique P_t, il *produit* une puissance mécanique utilisable P_u.

Son rendement est

$$\eta = \frac{\textit{Puissance mécanique utile}}{\textit{Puissance électrique reçue}} = \frac{P_u}{P_t}.$$

c) La puissance indiquée pour une machine est toujours la puissance utile. Par exemple, une génératrice de 22 *kilowatts* peut fournir à ses

bornes 22 *kilowatts*, soit 100 *ampères* et 220 *volts ;* un moteur de 50 *chevaux* peut fournir à sa poulie une puissance mécanique de 50 *chevaux-vapeur.*

Quelques grandes administrations, telles que la SNCF, la Marine nationale, indiquent la puissance des moteurs en *kilowatts* et non en *chevaux.* Ce mode de désignation se généralise peu à peu.

2. Détermination du rendement par la méthode des pertes séparées.

a) *La méthode directe* de détermination du rendement d'une génératrice ou d'un moteur consiste à mesurer P_u et P_t.

L'une de ces puissances, P_t pour un moteur, P_u pour une génératrice, est *électrique ;* un ampèremètre et un voltmètre suffisent pour la mesurer, du moins quand il s'agit de courant continu.

L'autre est une puissance *mécanique.* Or, la mesure d'une puissance mécanique avec un dynamomètre de transmission ou un frein de Prony n'est ni commode ni précise.

On emploie donc peu la méthode directe de mesure du rendement.

b) Les électriciens préfèrent la *méthode dite des pertes séparées.* Elle consiste à évaluer, par des mesures électriques, la puissance perdue p dans la transformation d'énergie qu'effectue la machine.

Comme $$P_t - P_u = p$$

deux de ces grandeurs étant mesurées, la troisième peut être calculée.

Le rendement d'une génératrice est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}$$

celui d'un moteur :

$$\eta = \frac{P_t - p}{P_t}.$$

3. Évaluation des pertes dans une dynamo (génératrice ou moteur).

Ces pertes comprennent :

1° les **pertes variables** avec la charge de la machine : ce sont les pertes en chaleur Joule dans l'induit et dans l'inducteur. La puissance ainsi perdue est facile à calculer quand on a mesuré la résistance des enroulements et le courant qui les parcourt;

2° les pertes que l'*on admet* être indépendantes de la charge. Ces **pertes constantes** sont :

les *pertes par frottements ;* frottements de l'arbre de l'induit sur ses

coussinets ou ses roulements, des balais sur le collecteur, frottement sur l'air en contact avec l'induit, frottement du ventilateur calé sur l'arbre dans l'air qu'il met en mouvement. On admet que ces pertes ne dépendent que de la vitesse et non de la charge, bien que cela ne soit pas rigoureusement exact;

les *pertes magnétiques* par hystérésis et courants de Foucault dans les organes de la machine soumis à un flux magnétique variable. Ces pertes dépendent de l'induction magnétique et de la vitesse, cause des variations du flux.

Pour mesurer les *pertes constantes*, on fait fonctionner la machine à vide à sa vitesse normale, en moteur, à excitation indépendante et on règle l'excitation pour que la *f. c. é. m.* de l'induit soit égale à la *f. é. m.* de la génératrice ou à la *f. c. é. m.* du moteur en charge. On mesure alors la puissance reçue par l'induit, on en retranche la puissance très faible consommée en chaleur Joule, si cette puissance n'est pas négligeable, et l'on obtient la puissance correspondant aux pertes constantes.

4. Exemple d'application de la méthode des pertes séparées.

Rendement en moteur à charge normale de la machine shunt étudiée dans les leçons précédentes.

Conditions de fonctionnement :

Tension normale ..... $U = 115\ V$
Intensité absorbée ..... $I_t = 16\ A$
Puissance reçue ..... $P_t = UI_t = 1\,840\ W$
Vitesse ..... $1\,550\ t/mn$

Mesures et calculs préliminaires :

Résistance de l'induit à chaud, entre bornes ..... $R_i = 0{,}93\ \Omega$
Résistance de l'inducteur à chaud (y compris le rhéostat) ..... $R_d = 190\ \Omega$
Courant d'excitation ..... $I_d = 0{,}6\ A$
Courant dans l'induit ..... $I_i = I_t - I_d = 15{,}4\ A$
Chute de tension dans l'induit ..... $R_iI_i = 13{,}9\ V$
F. c. é. m. à pleine charge ..... $E' = U - R_iI_i = 101\ V$

Essai en moteur à vide, à excitation séparée, à 1 550 t/mn, 101 V *aux bornes :*

Courant dans l'induit ..... $I_o = 1{,}1\ A$
Puissance absorbée ..... $E'I_o = 111\ W$
Pertes constantes ..... $E'I_o - R_iI_o^2 = 110\ W$

Pertes variables :

Dans l'induit : ..... $R_iI_i^2 = 220\ W$
Dans l'inducteur ..... $UI_d = 69\ W$

Pertes totales :

$$p = 110 + 220 + 69 = 399\ W$$

Calcul du rendement :

$$\eta = \frac{P_t - p}{P_t} = \frac{1\,441}{1\,840} = 0{,}78.$$

5. Remarques sur le rendement des dynamos.

Les toutes petites machines (100 à 200 *watts*) ont un rendement médiocre de 0,40 à 0,50. Les machines puissantes ont un rendement excellent (0,95 pour une génératrice de 1 000 *kilowatts*).

Le rendement d'une dynamo fonctionnant en moteur est légèrement supérieur à celui de la même machine employée comme génératrice.

La figure 1 indique les variations avec la charge du rendement d'une dynamo. Le rendement passe par un maximum aux environs de la pleine charge.

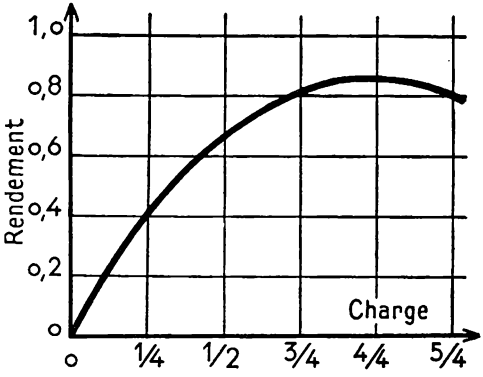


FIG. 1. — Variation du **rendement** d'une dynamo avec la charge.

B. — Installation électrique d'une machine à courant continu.

6. Cas d'une génératrice.

Soit à installer une génératrice de 5 *kilowatts* à 115 *volts* alimentant trois lignes également chargées.

a) ***Détermination des conducteurs.***

On procède comme pour une installation d'éclairage (17e leçon), en considérant successivement l'échauffement des conducteurs et la chute ohmique de tension qu'ils produisent.

Circuit de l'induit. — Le courant fourni par la génératrice est :

$$5\,000 : 115 = 44 \text{ } \textit{ampères}.$$

Un câble de 7 brins de 14/10, 750 T ou 750 RT, dont la section est 10,8 *millimètres carrés*, conduira ce courant sans que sa température s'élève de plus de 30°.

Dans les trois circuits dérivés, le courant peut atteindre 15 *ampères*, on emploiera du fil de 20/10, 750 T ou RT.

On vérifiera, par le calcul, que la chute de tension dans les lignes ne dépasse pas 5 %. Si cette chute était plus grande, on se servirait de fil de 25/10.

Circuit de l'inducteur. — Vous savez que le courant inducteur est inférieur à 5 % du courant débité, donc à 2 *ampères*. Un fil de 12/10 suffit pour conduire le courant.

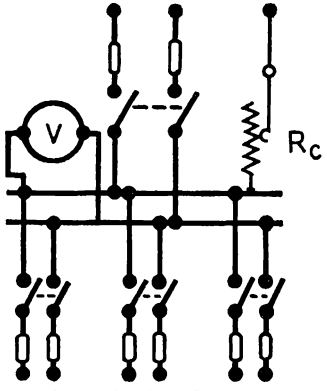


FIG. 2. — Schéma du **tableau de distribution** d'une petite génératrice à courant continu.

b) ***Accessoires.*** — Pour contrôler le fonctionnement de la génératrice, un *voltmètre* est indispensable; pour régler la tension, il faut un rhéostat de champ; un *interrupteur général, bipolaire avec fusibles* est utile; des *interrupteurs bipolaires avec fusibles* sont nécessaires au départ de chaque ligne dérivée (fig. 2).

Ces appareils sont disposés sur un tableau en marbre ou en tôle. Pour que l'ensemble ait bel aspect, souvent les résistances et les plots du rhéostat de champ sont mis derrière le tableau et la commande est faite par un volant placé à l'avant.

7. Cas d'un moteur.

Soit à installer un moteur de 5 *chevaux*, à 115 *volts*, dont le rendement est 0,80.

Pour calculer l'intensité absorbée à pleine charge, la puissance doit être évaluée en watts. De la formule

$$736\,P = UI\eta$$

on tire

$$I = \frac{736\,P}{U\eta},$$

soit en l'espèce

$$I = \frac{736 \times 5}{115 \times 0{,}80} = 40 \text{ } \textit{ampères}.$$

Le courant sera amené par des câbles de 7 brins de 14/10. Un conducteur de 12/10 suffira pour le circuit inducteur.

Le tableau d'arrivée de la ligne, placé à proximité du moteur, porte seulement deux coupe-circuit fusibles, un interrupteur bipolaire et le rhéostat de démarrage.

8. Réglage des balais d'une génératrice ou d'un moteur à courant continu.

a) La position des balais sur le collecteur devait changer quand

variait la charge des dynamos de fabrication ancienne, pour éviter la production d'étincelles abondantes détériorant les lames.

Les balais étaient fixés à la place correspondant au minimum d'étincelles.

b) Pour les machines actuelles, à pôles auxiliaires, quelle que soit la charge, *les balais doivent être placés sur la ligne neutre.*

Parfois leur position est indiquée par des repères tracés sur la carcasse de la machine. Si ce repérage manque, le réglage des balais doit être effectué par le monteur. Le procédé suivant est facile et précis.

Il se base sur le fait suivant : quand une bobine inductrice A et une bobine induite B ont leurs axes perpendiculaires, la bobine A n'induit aucune f. é. m. dans la bobine B (fig. 3).

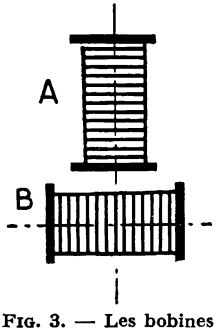


FIG. 3. — Les bobines A et B ont leurs axes perpendiculaires. Un flux variable dans A n'induit pas de f. é. m. dans B.

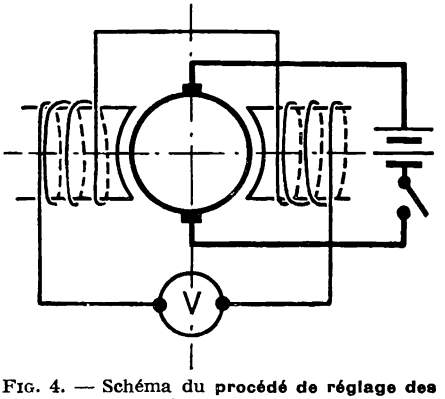


FIG. 4. — Schéma du **procédé de réglage des balais** d'une génératrice ou d'un moteur à courant continu.

Dans le cas d'une dynamo, la bobine A est représentée par l'enroulement de l'induit, la bobine B par l'enroulement inducteur.

Un ou deux éléments d'accumulateurs sont montés avec un interrupteur et un rhéostat aux bornes de l'induit, un voltmètre est branché aux bornes de l'inducteur (fig. 4).

Par tâtonnements, on détermine la position des balais pour laquelle *l'établissement ou la suppression d'un courant intense dans l'induit ne produisent aucun déplacement de l'aiguille du voltmètre branché sur l'inducteur.*

C. — Couplage des génératrices de courant continu.

9. Couplage en parallèle de génératrices shunt.

a) La figure 5 est le schéma de deux génératrices shunt montées en parallèle sur le même réseau.

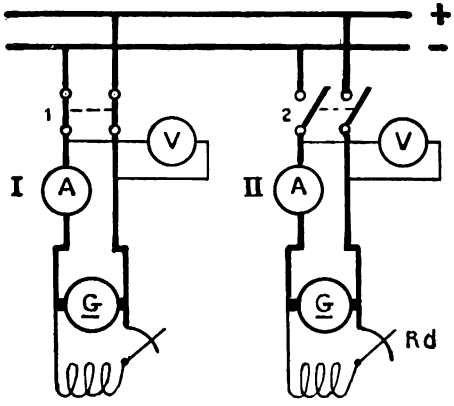


FIG. 5. — **Couplage en parallèle** de deux génératrices shunt. R_d est un rhéostat d'excitation.

Pour brancher la génératrice II sur la ligne, on la met en marche à sa vitesse normale; puis, avec le rhéostat d'excitation, on règle sa tension pour qu'elle soit égale à celle du réseau et l'on ferme l'interrupteur 2. En manœuvrant les rhéostats d'excitation, on répartit ensuite la charge entre les génératrices en service.

Pour mettre hors circuit la génératrice II, on diminue l'intensité qu'elle fournit en réduisant son excitation; quand son débit est très faible, on ouvre l'interrupteur 2 et l'on arrête la machine.

b) Ce couplage est *stable*. Si, par suite du ralentissement du moteur de commande, la f. é. m. d'une machine diminue, la dynamo fonctionne en moteur en prenant du courant à la ligne sans que son sens de rotation ni la polarité de ses inducteurs soient changés. Elle reprend son rôle de génératrice quand sa vitesse ou son excitation sont augmentées.

10. Couplage en série de dynamos shunt.

a) Ce couplage est employé pour obtenir avec deux génératrices à 115 *volts* un réseau de distribution à trois fils pouvant alimenter à la fois des récepteurs à 115 et 230 *volts*.

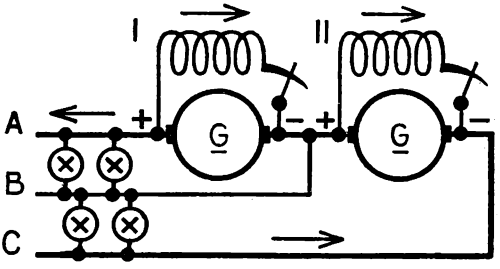


FIG. 6. — **Couplage en série défectueux** de deux génératrices shunt.

b) Il ne suffit pas de brancher les deux dyna-

mos comme l'indique la figure 6. La mise en marche ou l'arrêt des deux machines ne peuvent être rigoureusement simultanés; or, si la dynamo II, par exemple, est arrêtée alors que la dynamo I fonctionne et que les circuits extérieurs sont fermés, le courant n'a plus son sens normal dans l'inducteur de la machine II : la polarité de cette dynamo est inversée et ne se rétablit pas spontanément,

On évite cet inconvénient en montant les inducteurs des deux dynamos en série sur les conducteurs extrêmes de la ligne (fig. 7).

Mais alors les génératrices ne sont plus réglables séparément. Il vaut mieux prendre le courant d'excitation de chaque machine aux bornes de la même génératrice, de la dynamo I par exemple (fig. 8). La génératrice II fonctionne alors à excitation indépendante. La figure 9 est une autre disposition du schéma de la figure 8.

11. Couplage en parallèle de génératrices compound.

Ce couplage est utilisé dans les centrales alimen-

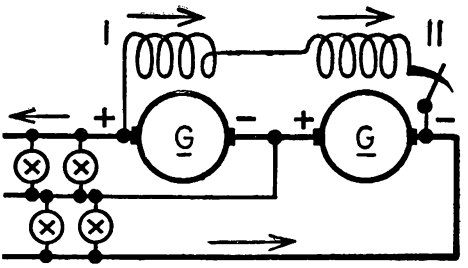


FIG. 7. — Dans ce **couplage en série** de deux dynamos shunt, les deux inducteurs sont en série.

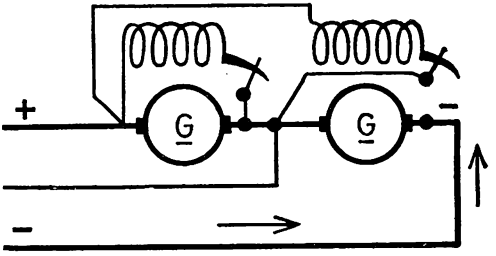


FIG. 8. — Dans ce **couplage en série** de deux dynamos, une seule génératrice fournit le courant inducteur aux deux machines.

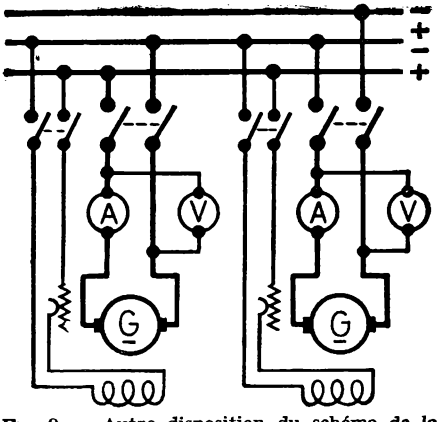


FIG. 9. — Autre disposition du schéma de la figure 8.

tant un réseau de traction à courant continu, où l'emploi des dynamos compound est général.

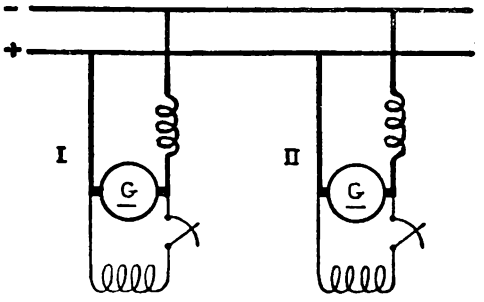


FIG. 10. — **Couplage en parallèle** dangereux de deux dynamos compound. Le courant peut s'inverser dans l'enroulement série de l'une des machines.

Le schéma de la figure 10 représente un montage défectueux et dangereux. Si, pour une raison quelconque, la f. é. m. de la machine I devient plus grande que celle de la machine II, la dynamo I envoie du courant dans II dont la polarité de l'enroulement série s'inverse ; le déséquilibre entre les deux machines s'accentue et la dynamo II, qui fonctionne en moteur à compoundage différentiel, prend à la ligne un courant important et tourne à une vitesse excessive.

On évite cet accident en réunissant les balais qui correspondent aux enroulements série par un gros conducteur, peu résistant, nommé **fil compensateur** ou **fil d'équilibre.** S'il y a courant de circulation entre les deux machines, il passe par ce fil et non plus par l'enroulement série (fig. 11).

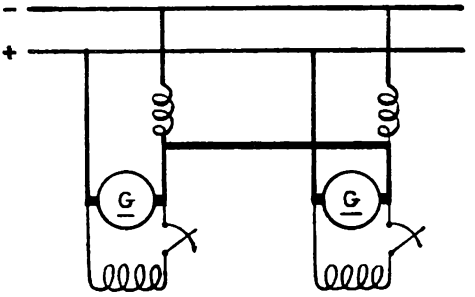


FIG. 11. — **Couplage en parallèle** correct de deux dynamos compound. Un conducteur d'équilibre réunit les deux entrées des enroulements série.

Les manœuvres à effectuer pour mettre une machine compound en service ou pour la retirer du circuit sont les mêmes que pour une dynamo shunt.

RÉSUMÉ

1. — Le rendement d'une génératrice ou d'un moteur est le rapport de la puissance utile produite par la machine à la puissance qui lui est fournie :

$$\eta = \frac{P_u}{P_t}.$$

On détermine le rendement par la *méthode des pertes séparées.*

En désignant par p la puissance perdue dans la machine, pour une

génératrice : $$\eta = \frac{P_u}{P_u + p}$$

pour un moteur : $$\eta = \frac{P_t - p}{P_t}.$$

2. — Pour choisir les conducteurs de branchement d'une dynamo ou d'un moteur, l'électricien doit déterminer l'intensité du courant débité ou absorbé et tenir compte des conditions d'échauffement et de chute de tension.

On règle les balais d'une machine à courant continu pour que l'induit parcouru par un courant variable ne produise aucune f. é. m. aux bornes de l'inducteur.

3. — Les dynamos shunt se couplent en parallèle sans difficulté. Pour les coupler en série, tous les courants d'excitation doivent être fournis par la même machine.

Quand on couple des dynamos compound en parallèle, un gros fil d'équilibre réunit les bornes d'induit connectées aux enroulements série.

EXERCICES

1. Quelle doit être la puissance en chevaux d'un moteur destiné à commander une génératrice à courant continu de 10 *k*W dont le rendement est 0,82?

Réponse : 16,6 *chevaux.*

2. Quelle est le courant absorbé à pleine charge par un moteur à 230 *volts* de 2 *chevaux* dont le rendement est 0,75?

Réponse : 8,65 *ampères.*

3. Un moteur de 10 *ch*, 220 *V*, absorbe en charge un courant de 45 *A*.
Quel est le rendement de ce moteur?
La résistance de l'induit est 0,2 Ω, celle de l'inducteur, 200 Ω.
Quel est le courant dans l'induit?
Quelle est la f. c. é. m. du moteur?

Réponses : 0,745; 43,9 *A;* 211,2 *V.*

4. Un moteur à courant continu commande une pompe centrifuge qui élève 10 *litres* d'eau par seconde à 15,5 *mètres* de hauteur. Le moteur, dont le rendement est 0,82, absorbe 28,5 *A* sous 110 *V*. Calculer

1° le rendement global du groupe moto-pompe;
2° la puissance mécanique fournie par le moteur à la pompe;
3° le rendement de la pompe.

Réponses : 0,49; 2 570 *W;* 0,593.

5. Une machine à coudre est commandée par un moteur de $\frac{1}{16}$ *cheval* dont le rendement est 0,55.

Que coûte l'heure d'emploi de ce moteur quand l'énergie électrique est payée **0,25 F** le *kWh?*

6. Dessiner le tableau de distribution correspondant au schéma de la figure 2. Sur la face avant, les appareils seront disposés de façon commode et agréable à l'œil. Sur la face arrière, on figurera les connexions en évitant le plus possible les croisements de conducteurs.

7. La résistance de l'induit d'un moteur shunt est 1,05 Ω; celle de l'inducteur 394 Ω.

A vide, alimenté sous la tension de 220 *V*, le moteur absorbe un courant *total* de 1,5 *A* et tourne à la vitesse de 1 690 *t/mn.*

1° Calculer l'intensité du courant inducteur.

2° Calculer l'intensité du courant dans l'induit.

3° Déterminer la f. c. é. m. du moteur.

A pleine charge, alimenté sous la tension de 220 *V*, le moteur absorbe une intensité totale de 13,6 *A*.

4° Quelle est l'intensité du courant inducteur?

5° Quelle est l'intensité du courant dans l'induit?

6° Déterminer la f. c. é. m. du moteur.

7° A quelle vitesse tourne le moteur?

Réponses : 0,56 *A ;* — 0,94 *A ;* — 219 *V ;* — 0,56 *A ;* — 13 *A ;* — 206,4 *V ;* — 1 590 *t/mn.*

8. Avec un moteur série, on veut commander un treuil pour soulever des pierres. Les charges à soulever sont de 250 *kg.*

Le rendement du treuil est 0,75. Le tambour sur lequel s'enroule la corde supportant la charge a un diamètre de 159 *mm.*

Le moteur est alimenté sous 115 *V;* il a une puissance de 2 *ch;* son rendement est 0,80; à pleine charge, sa vitesse est 1 620 *t/mn.*

Calculer :

1° la puissance utile disponible au tambour du treuil; évaluée en *chevaux* et en *kgm/s;*

2° la vitesse en *m/s* de montée de la charge;

3° la vitesse en *t/mn* du tambour du treuil;

4° le rapport dans lequel les engrenages du treuil réduisent la vitesse du moteur;

5° l'intensité du courant absorbé par le moteur à pleine charge.

Réponses : 1,5 *ch;* — 112,5 *kgm/s;* — 0,45 *m/s* — 108 *t/mn;* — 1/15; — 16 *A.*

DEUXIÈME PARTIE

COURANT ALTERNATIF

8. QUELQUES PROPRIÉTÉS DU COURANT ALTERNATIF

Comparaison expérimentale du courant alternatif et du courant continu.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une batterie de trois éléments d'accumulateurs.
Un transformateur monophasé 115-6 volts.
Un montage pour fusion d'un fil de fer : diamètre 2/10, *longueur* 45 mm.
Un montage pour fusion d'une pointe de charpentier.
Un électro à avalement.
Une aiguille aimantée sur pivot.
Un bac pour électrolyse d'eau de soude.
Le matériel pour l'expérience des tirets bleus (expérience de Janet), savoir : solutions à 10 % *de ferrocyanure de potassium, de chlorure de sodium ou de nitrate d'ammonium, feuille de zinc (*200 × 300 mm), *papier buvard blanc, électrodes en fil d'acier sur manche isolant.*

LEÇON

Nous allons reprendre quelques expériences faites au cours de la première leçon d'électricité, en les effectuant d'abord avec du courant continu, ensuite avec du courant alternatif, pour que vous compariez les résultats.

1. Sources de courant employées.

Le générateur de courant continu est une batterie d'accumulateurs de 6 *volts*.

Le courant alternatif est fourni par le secteur. La prise de courant alimente un petit transformateur [1].

2. Le courant alternatif possède des propriétés calorifiques comme le courant continu.

a) ***Expériences avec du courant continu.*** — En faisant passer le courant fourni par la batterie d'accumulateurs dans :

1° un fil de fer de diamètre 0,2 *mm*, long de 90 *mm*, *le fil rougit*,

2° — — 0,2 *mm*, — 45 *mm*, *le fil fond*,

quel que soit le sens du courant dans le fil chauffé (fig. 1).

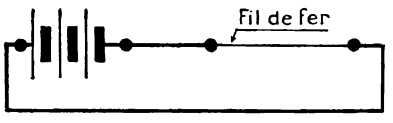


FIG. 1. — Le fil de fer est **chauffé** au rouge et fondu par un **courant continu.**

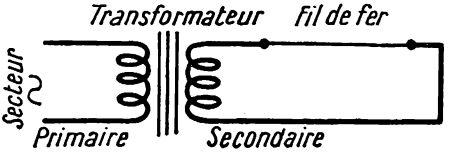


FIG. 2. — Le fil de fer est **chauffé** au rouge et fondu par un **courant alternatif.**

b) ***Expériences avec du courant alternatif.*** — Nous chauffons au rouge un fil de fer et nous en fondons un autre un peu plus court (fig. 2), comme avec du courant continu. Les résultats sont les mêmes si nous intervertissons les conducteurs aux bornes du transformateur.

Comme le transformateur employé, malgré sa petite taille, est puissant et robuste, nous pouvons rendre l'expérience plus brillante en fondant, avec le courant qu'il débite, une pointe de charpentier ayant 2 *millimètres* de diamètre (fig. 3).

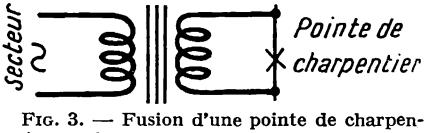


FIG. 3. — Fusion d'une pointe de charpentier par le **courant alternatif** fourni par un transformateur.

c) ***Conclusion.*** — *Les propriétés calorifiques du courant alternatif sont les mêmes que celles du courant continu.*

Les appareils de chauffage électrique, tels que fers à repasser, radia-

1. Voir 40e leçon. Le transformateur est équipé au primaire (115 V) avec deux bobines de 180 spires en série, au secondaire (6 V) avec deux bobines de 9 spires en série.

teurs, cuisinières électriques, etc., fonctionnent indifféremment avec du courant alternatif ou avec du courant continu. Il en est de même des lampes à incandescence.

3. Le courant alternatif possède des propriétés magnétiques un peu différentes de celles du courant continu.

a) ***Expériences avec du courant continu.*** — 1° Nous faisons fonctionner un électro-aimant à avalement (fig. 4). Une aiguille aimantée mobile, approchée d'une extrémité du noyau, indique que cette extrémité est, par exemple, un *pôle nord*. En intervertissant les connexions à la batterie d'accumulateurs, le noyau plonge dans la bobine de la même façon, mais son extrémité supérieure est devenue un *pôle sud*.

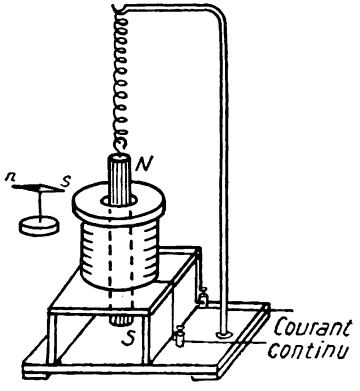


FIG. 4. — **Électro-aimant** à avalement fonctionnant avec du **courant continu.** L'aiguille aimantée indique que l'extrémité supérieure du noyau est, par exemple, un pôle nord.

2° En tendant le fil conducteur du courant dans la direction Nord-Sud au-dessus de l'aiguille aimantée mobile, vous constatez que le courant fait dévier l'aiguille aimantée dans un certain sens. En intervertissant les connexions à la batterie, vous remarquez que l'aiguille aimantée dévie dans le sens contraire (fig. 5).

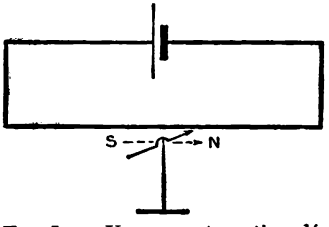


FIG. 5. — Un **courant continu** dévie une aiguille aimantée mobile placée dans son voisinage. La pointe nord de l'aiguille se porte à la gauche du courant.

Ces deux expériences indiquent une différence entre les bornes de la source de courant continu : l'une est le **pôle positif,** *l'autre le* **pôle négatif.**

b) ***Expériences avec du courant alternatif.*** — 1° Alimentons l'électro-aimant avec du courant alternatif : le noyau est avalé par

la bobine. Une aiguille aimantée mobile approchée de l'extrémité extérieure du noyau vibre, mais ne dévie pas (fig. 6).

2° Un conducteur parcouru par du courant alternatif, placé dans la direction Nord-Sud au-dessus d'une aiguille aimantée mobile, ne la fait pas dévier. L'aiguille vibre, ce qui indique que le courant agit sur elle, mais elle ne change pas de direction (fig. 7).

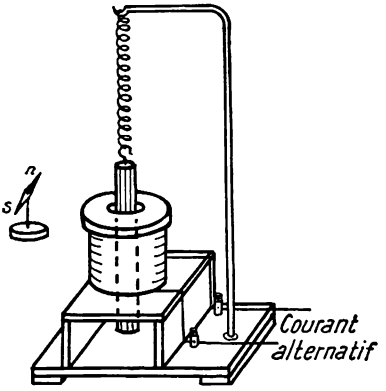


FIG. 6. — **Électro-aimant** à avalement fonctionnant avec du **courant alternatif.** Les extrémités du noyau ne sont pas polarisées.

c) ***Conclusion.*** — *Le courant alternatif possède des propriétés magnétiques, mais ces propriétés ne marquent aucune différence entre les bornes du générateur.*

On se sert du courant alternatif pour exciter des électro-aimants. La carcasse de ces appareils destinés à du courant alternatif est feuilletée

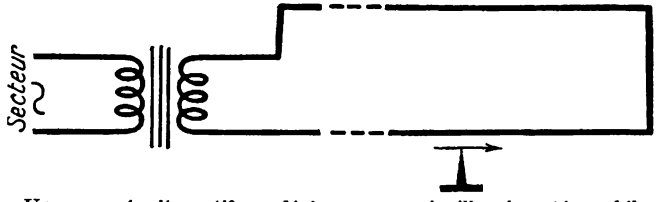


FIG. 7. — Un **courant alternatif** ne dévie pas une aiguille aimantée mobile, il la fait seulement vibrer.

ou faite de fils de fer serrés en paquet pour réduire les courants de Foucault.

4. Le courant alternatif produit aussi des décompositions chimiques.

a) ***Expériences avec du courant continu.*** — 1° Électrolysons de l'eau de soude dans un voltamètre. Il se dégage de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode. Le volume de l'hydrogène est double de celui de l'oxygène (fig. 8).

2° Électrolysons, avec des électrodes en cuivre, du sulfate de cuivre dissous dans l'eau. Du cuivre se transporte de l'anode à la cathode (fig. 9).

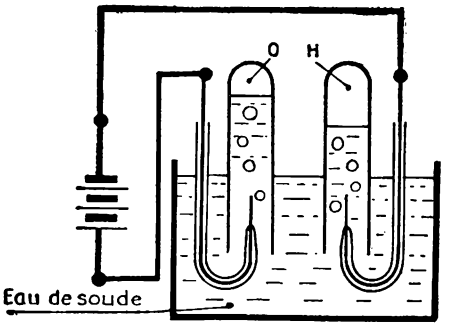


FIG. 8. — **Électrolyse** d'eau de soude **par un courant continu.** Les constituants de l'eau se séparent : l'hydrogène à la cathode, l'oxygène à l'anode.

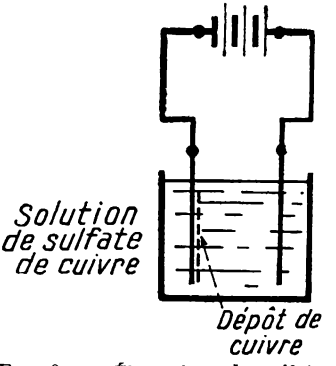


FIG. 9. — **Électrolyse** de sulfate de cuivre **par du courant continu.** Du cuivre est transporté de l'anode à la cathode.

b) ***Expériences avec du courant alternatif.*** — 1° L'électrolyse de l'eau de soude produit des volumes égaux de gaz aux deux électrodes (fig. 10). Quand on enflamme ce gaz, une petite explosion se produit : le gaz est formé d'un mélange d'hydrogène avec la moitié de son volume d'oxygène. Il résulte de la décomposition de l'eau sans séparation des constituants.

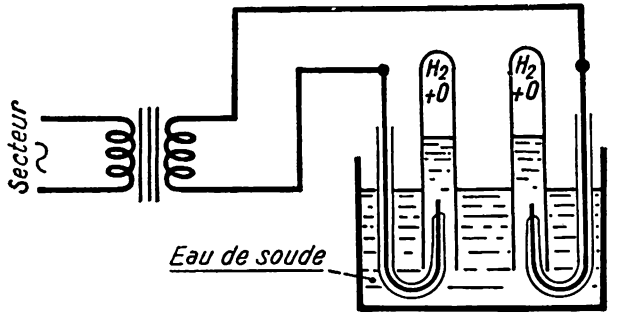


FIG. 10. — **Électrolyse** d'eau de soude **par du courant alternatif.** Les constituants de l'eau sont mélangés dans chacune des éprouvettes coiffant les électrodes.

2° Le courant alternatif traverse une dissolution de sulfate de cuivre sans produire de modification des électrodes.

c) ***Conclusion.*** — *Les décompositions électrolytiques produites par un courant alternatif n'indiquent aucune différence entre les électrodes des appareils à électrolyse.*

5. Une expérience d'électrolyse très instructive.

L'électrolyte est un mélange d'une solution de ferrocyanure de potassium et d'une solution de chlorure de sodium. Une feuille de papier buvard blanc a été imbibée du liquide, puis égouttée.

a) ***Expérience avec du courant continu.*** — La feuille humide est placée sur une plaque de zinc. Nous passons rapidement sur le papier deux pointes en fer, émoussées, fixées sur un support isolant et connectées chacune à une borne de la batterie d'accumulateurs (fig. 11).

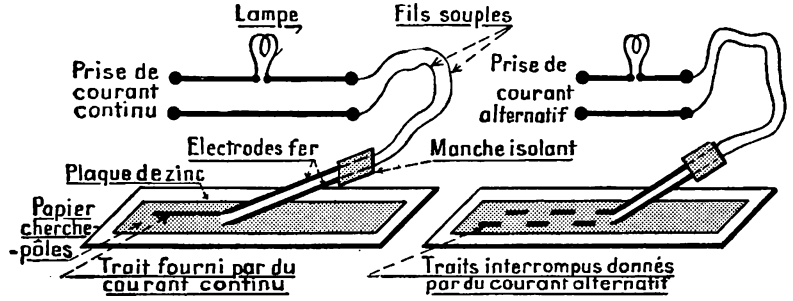


FIG. 11. — Expérience avec du **courant continu à gauche**, avec du **courant alternatif à droite.**

Vous constatez que la tige de fer reliée au pôle positif trace sur le papier *un trait continu bleu;* le chemin suivi par l'autre pointe de fer n'est pas coloré.

La coloration bleue de la ligne tracée par l'anode s'explique par la formation d'un peu de chlorure ferrique qui, avec le ferrocyanure, donne du bleu de Prusse.

b) ***Expérience avec du courant alternatif.*** — Les deux pointes de fer sont reliées aux bornes du transformateur source de courant alternatif.

En passant les pointes sur le papier humide, *nous obtenons deux lignes de tirets bleus.* Les tirets sont séparés par des intervalles non colorés. A un tiret d'une ligne correspond un intervalle de l'autre (fig. 11).

c) ***Interprétation.*** — Cette dernière expérience montre que chaque électrode, et par conséquent chaque borne du générateur de courant alternatif, est alternativement positive et négative.

En d'autres termes, **un courant alternatif est un courant qui change de sens périodiquement.**

6. Fréquence et période d'un courant alternatif.

1° Imaginons que, dans l'expérience précédente, on déplace les pointes de fer sur le papier humide pendant une seconde exactement. Si l'on compte les tirets tracés par une électrode, on en trouve 50.

Le courant fourni par le secteur (et le transformateur) passe, pendant 1 seconde, 50 fois dans un sens et 50 fois en sens contraire. On dit que *la fréquence de ce courant est* 50 *périodes par seconde ou* 50 *hertz.*

La fréquence d'un courant alternatif est le nombre de fois que ce courant reprend le même sens pendant une seconde.

L'unité de fréquence est le **hertz** (Hz) [1], qui vaut 1 période par seconde; on lui donne quelquefois le nom de *cycle* et de *période par seconde.* En France, la fréquence du courant des secteurs publics (fréquence standard) est 50 *hertz.*

2° Si l'on déplace les pointes de fer d'un mouvement uniforme, les traits bleus ont tous la même longueur, qui est aussi celle de leurs intervalles. Il s'écoule donc le même temps entre deux reprises consécutives du même sens par le courant.

Le temps qui s'écoule entre deux reprises consécutives du même sens par un courant alternatif se nomme la période du courant.

La période du courant des secteurs de fréquence standard est :

$$1 : 50 = 0{,}02 \text{ } \textit{seconde.}$$

et d'une façon générale entre la période T d'un courant alternatif et sa fréquence f existe la relation

$$T = \frac{1}{f}$$

seconde hertz

7. Mesure de la fréquence des courants alternatifs.

On emploie industriellement des *fréquencemètres à lecture directe.* Nous indiquerons seulement le principe du *fréquencemètre à lames vibrantes* souvent utilisé sur les tableaux de distribution.

Une lame mince d'acier, dont une extrémité est fixe et l'autre libre (fig. 12), vibre quand elle est mise en mouvement par un moyen quelconque; son nombre de vibrations [2] par seconde, que l'on nomme *fré-*

1. Hertz, physicien allemand (1857-1894); ses travaux conduisirent à la T. S. F.
2. Une vibration comporte un aller et retour de la lame vibrante.

quence propre de la lame, dépend seulement de sa longueur et de son épaisseur.

Treize lames de même longueur sont ajustées pour que leur *fréquence propre* soit 88 vibrations par seconde pour la première, 90 pour la seconde, ...100 pour la septième, ...112 pour la treizième.

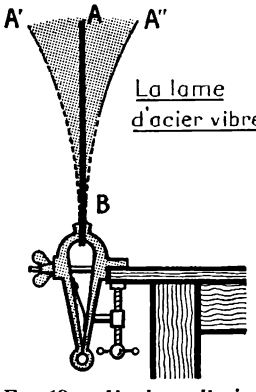


FIG. 12. — **Une lame d'acier,** dont une extrémité est fixe, **vibre** quand on la lâche après l'avoir écartée de sa position d'équilibre.

Elles sont disposées toutes, l'une à côté de l'autre, devant un électro-aimant feuilleté excité par le courant dont on mesure la fréquence (fig. 13). Elles sont attirées et l'attraction est maximum deux fois par période du courant. Elles vibrent. Celle dont la fréquence propre est égale à deux fois la fréquence du courant vibre beaucoup plus fort que les autres. Une petite plaque blanche, fixée à l'extrémité libre de chaque lame, rend la vibration visible de loin. Il suffit de lire le nombre correspondant à la lame qui vibre le plus fort pour connaître la fréquence du courant (fig. 14).

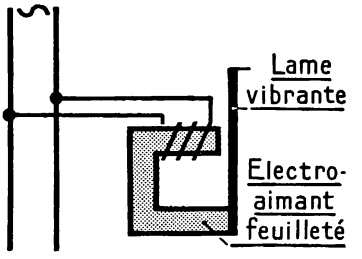


FIG. 13. — **L'électro-aimant,** excité par du courant alternatif, **fait vibrer** fortement **la lame d'acier** qui correspond à la fréquence du courant.

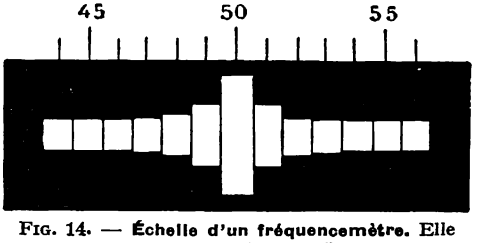


FIG. 14. — **Échelle d'un fréquencemètre.** Elle marque la fréquence 50.

8. Conclusion.

Sachant que le courant alternatif que nous avons employé dans les expériences de cette leçon passe 50 fois dans un sens et 50 fois dans le sens contraire au cours de chaque seconde, vous vous expliquerez facilement les résultats que vous avez observés.

1° Le dégagement de chaleur dans un conducteur ne dépend pas du sens du courant; aussi les propriétés calorifiques du courant alternatif ne diffèrent-elles pas de celles du courant continu.

2° Du sens d'un courant continu dépend le sens du champ magnétique créé par le courant qui oriente une aiguille aimantée voisine, ou détermine la polarité des extrémités d'un noyau d'électro-aimant. Le sens du champ magnétique créé par un courant alternatif change avec la même fréquence que le courant; une aiguille aimantée, à cause de son inertie, ne peut obéir à une impulsion du champ avant de recevoir une impulsion contraire; elle vibre mais ne change pas d'orientation.

3° Les électrodes d'un appareil à électrolyse traversé par du courant alternatif sont alternativement anode et cathode. Il en résulte ou que les produits de l'électrolyse recueillis à chaque électrode sont un mélange des corps se dégageant à l'anode et à la cathode (cas de l'électrolyse de l'eau de soude), ou bien que l'effet chimique du courant d'un certain sens pendant une demi-période est annulé par l'effet contraire du courant passant dans l'autre sens pendant la demi-période suivante (cas du bac à sulfate de cuivre).

RÉSUMÉ

1. — Les phénomènes calorifiques et chimiques que produit un courant alternatif montrent que les deux bornes d'un générateur ou d'un récepteur de courant alternatif ont des propriétés identiques.

2. — Pendant chaque seconde, le courant alternatif fourni par les secteurs de distribution passe 50 fois dans un sens et 50 fois dans le sens contraire.

La fréquence d'un courant alternatif est le nombre de fois que le courant reprend le même sens pendant une seconde. Elle s'évalue en *périodes par seconde ou hertz.*

La période T d'un courant alternatif est le temps qui s'écoule entre deux reprises consécutives du même sens par le courant : $T = 1 : f$.

EXERCICES

1. Si l'on effectuait les expériences décrites dans la leçon avec du courant alternatif de très basse fréquence (4 ou 5 *p/s*), quels résultats obtiendrait-on?

2. Les courants utilisés en T. S. F. sont des courants alternatifs de fréquence très élevée. L'unité de fréquence, la période par seconde, est nommée *cycle;* on emploie habituellement son multiple le *kilocycle.* Quelle est la fréquence en *p/s* du courant d'une émission faite à 859 *kilocycles?* Quelle est la période de ce courant?

3. Un courant continu ou alternatif se propage dans un fil conducteur avec une vitesse que l'on a pu mesurer et qui est $V = 300\,000$ *km/s.* Dans le cas d'un courant alternatif de fréquence f, tous les points du conducteur qui se trouvent à une distance $l = V : f$ les uns des autres sont dans le même état électrique. On donne à la longueur $l = V : f$ le nom de *longueur d'onde.*

Quelle est en *mètres* la longueur d'onde d'une émission de T. S. F. dont la fréquence est 695 *kilocycles?* Quelle est la fréquence d'une émission dont la longueur d'onde est 224 *mètres?*

Réponses :
431,7 *m;* 1 339 *kilocycles.*

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

Électrodes pour l'expérience des tirets bleus.

Pour que les deux électrodes s'appliquent facilement à la fois sur le papier imbibé d'électrolyte, il est bon qu'elles soient élastiques. On les fabrique avec du fil d'acier trempé de 1 à 2 *mm* de diamètre, par exemple de la corde à piano.

Il suffit de deux brins de 100 *mm* de long. On les détrempe sur une longueur de 35 *mm* pour les plier à 90° et les terminer par une boucle de 5 à 6 *mm* (fig. 15).

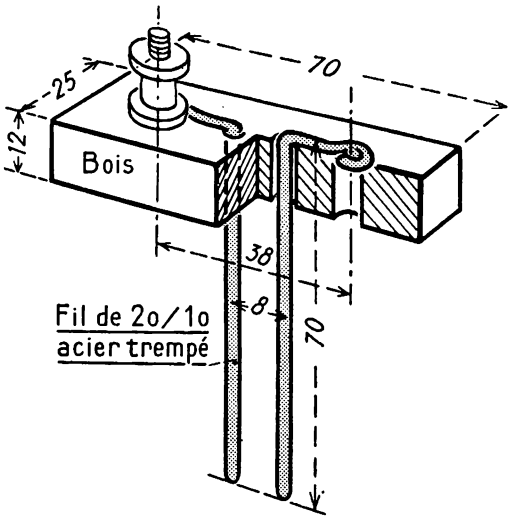


FIG. 15. — **Électrodes d'acier** pour l'expérience de la figure 11.

Les fils traversent une planchette de bois dur par deux petits trous percés à 8 *mm* l'un de l'autre. Ils sont fixés sous les deux bornes d'amenée du courant.

Un appareil analogue avec trois électrodes écartées de 8 *mm* sert à montrer le déphasage les uns sur les autres des trois courants triphasés du secteur.

Représentations des courants et des tensions sinusoïdaux.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un oscillographe cathodique d'enseignement.

LEÇON

1. Avec des appareils nommés oscillographes, on enregistre les variations du courant ou de la tension.

La fréquence du courant alternatif du réseau est 50 Hz, celle des courants utilisés en radio dépasse 1 million de *hertz*. L'aiguille d'un ampèremètre ou d'un voltmètre ne peut osciller à de telles fréquences; enregistrer les variations d'un courant ou d'une tension se modifiant si rapidement semble un problème expérimental difficile à résoudre. Pourtant on en a donné plusieurs solutions et construit des **oscillographes** électromagnétique et électronique.

Nous décrirons seulement le modèle le plus répandu, l'**oscillographe cathodique.**

Vous avez tous vu un récepteur de télévision, le **tube cathodique,** sur l'écran duquel vous admirez les images, en est une partie essentielle.

C'est également la partie principale d'un oscillographe cathodique.

De nombreuses expériences ont montré que les courants électriques étaient dus au déplacement de petites particules d'électricité négative, les **électrons.**

La quantité d'électricité transportée par chaque électron est très faible : $1{,}6.10^{-19}$ *coulomb*; la masse d'un électron est exprimée par un nombre encore bien plus petit : $0{,}9.10^{-30}$ *kilogramme*. Ces chiffres confondent l'imagination, c'est pourtant grâce à cette masse si faible qu'un pinceau d'électrons pourra vibrer à de très hautes fréquences.

2. L'oscillographe cathodique.

Sa partie principale est le tube cathodique (fig. 1). Des électrons émis par un filament chaud sont accélérés par un ensemble d'électrodes formant un *canon à électrons*. Ce canon produit dans le vide du tube un **pinceau d'électrons** se déplaçant à la vitesse de quelques milliers de *kilomètres par*

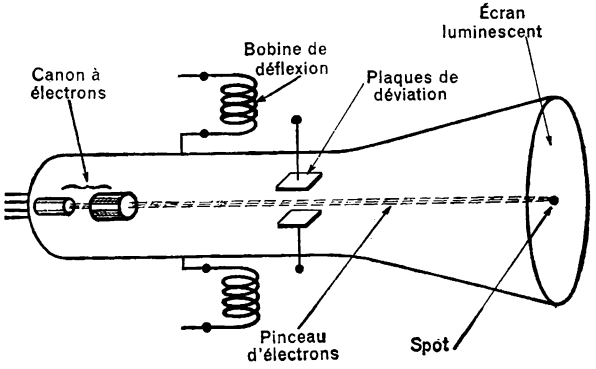


FIG. 1. — Un tube **d'oscillographe cathodique.**

seconde. Ces électrons ne sont pas visibles, mais ils viennent buter contre un écran recouvert de substances luminescentes, qui s'illuminent sous le choc des électrons. On observe une petite tache lumineuse sur l'écran, le **spot.**

Si une cause quelconque modifie la direction du pinceau d'électrons, le spot se déplace sur l'écran. Nous observons ses déplacements.

Par exemple, si nous approchons un aimant du tube cathodique, le spot se déplace. En effet des électrons en mouvement constituent un courant, ils sont sensibles à l'action des champs magnétiques.

Pour créer ces champs, on dispose des **bobines,** dites de déflexion autour du tube cathodique.

Envoyons un courant continu de 1 *A* dans les bobines dont l'axe est horizontal : le spot se déplace verticalement de 15 *mm*. Augmentons le courant, pour 2 *A* la déviation est de 30 *mm*.

Le déplacement du spot est proportionnel au courant dans les bobines de déflexion.

Remplaçons le courant continu par un courant alternatif, nous observons sur l'écran un segment lumineux vertical.

Si nous envoyons un courant alternatif dans les bobines d'axe vertical, nous observons sur l'écran un segment lumineux horizontal.

En faisant agir simultanément un courant, dit *de balayage*, d'intensité croissant régulièrement pendant une période, qui produit une déviation

horizontale du spot, et le courant à étudier produisant une déviation verticale, nous observons, sur l'écran, la courbe des variations du courant pendant une période (fig. 2).

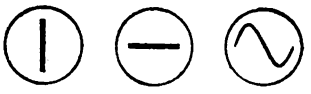


FIG. 2. — Le spot se déplace sur l'écran du tube cathodique.

Le tube cathodique comprend également deux paires de plaques, dites de déviation horizontale et verticale, qui peuvent agir sur le pinceau d'électrons lorsqu'on applique entre elles des tensions continues ou alternatives. Elles permettent d'observer les variations d'une tension.

3. Examinons la courbe représentant un courant alternatif.

La figure 3 est la courbe d'un courant alternatif fourni par le secteur. Elle est très régulière et ressemble de très près à une courbe que les mathématiciens nomment **sinusoïde.** Cette ressemblance n'est pas fortuite, les constructeurs d'alternateurs cherchent à l'obtenir.

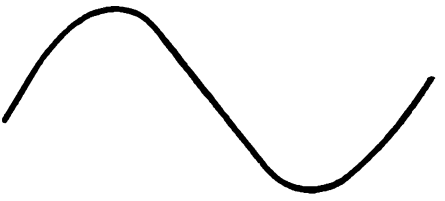


FIG. 3. — **Courbe d'un courant alternatif** donnée par un oscillographe.

Un courant qui peut se représenter par une sinusoïde est un **courant sinusoïdal.** Avec une approximation très suffisante en pratique, on peut admettre que les courants alternatifs distribués par les secteurs publics sont sinusoïdaux.

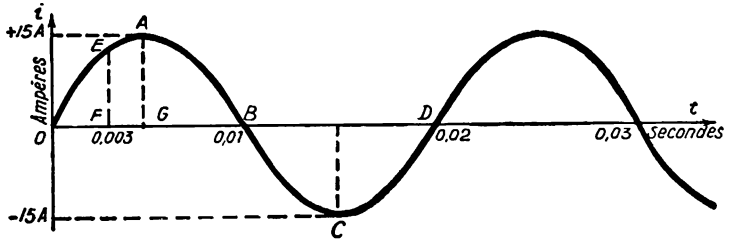


FIG. 4. — Sur cette courbe d'un courant sinusoïdal sont tracées deux ordonnées, l'une GA représente le **courant maximal**, l'autre FE, un **courant instantané.**

La courbe figure 4 est celle d'un courant sinusoïdal.

Sur l'axe O*t*, les abscisses représentent les durées de passage du courant, évaluées en secondes et comptées à partir d'un instant initial correspondant au point O; OD est *une période*, OB une *demi-période.*

Dans la direction O*i*, les ordonnées mesurent les intensités du courant; elles sont positives au-dessus de l'axe des abscisses et négatives au-dessous, mais ces sens sont arbitraires.

La courbe se compose d'une suite d'**ondes** identiques, telles que OABCD qui se reproduisent à l'intervalle d'une période. Chaque demi-onde, telle que OAB ou BCD, est une **alternance.**

A l'instant 0, le courant est nul, puis il croît dans le sens positif. A un instant déterminé, par exemple au bout de 0,003 *seconde*, le courant a une valeur *i*, en l'espèce 12,1 *ampères*, c'est le **courant instantané** à l'instant $t = 0{,}003$ *seconde*.

Le courant continue à croître jusqu'à une valeur maximale, 15 *ampères* sur la figure, correspondant à 1/4 de période; c'est la **valeur maximale** du courant sinusoïdal (symbole I_m).

Ensuite le courant décroît, s'annule au bout d'une demi-période, change de sens, passe par la valeur $-I_m$, pour changer à nouveau de sens à la fin de la période et ainsi de suite.

4. Quelques rappels :

A. Rappelons d'abord la définition du **sinus d'un angle.**

1° Soit un angle *aigu* XOY = α (fig. 5). Le **sinus** de cet angle α est le rapport $\frac{aA}{OA}$.

Ce rapport est indépendant de la position du point A sur la droite OY, par exemple le rapport $\frac{a'A'}{OA}$ est égal au rapport $\frac{aA}{OA}$ à cause de la similitude des triangles rectangles O*a*'A' et O*a*A.

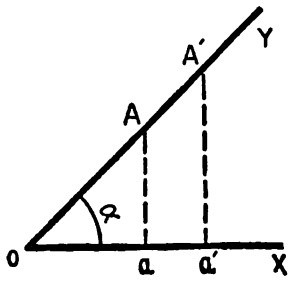


FIG. 5. — Le **sinus de l'angle aigu** α est le rapport $\frac{aA}{OA}$. Sa valeur est la même quelle que soit la position du point A sur OY.

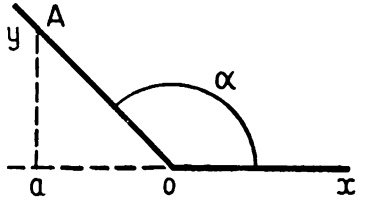


FIG. 6. — Le **sinus de l'angle obtus** α, compris entre 90° et 180°, est aussi le rapport $\frac{aA}{OA}$.

2° Soit un angle obtus xOy compris entre 90° et 180° (fig. 6). Le sinus de cet angle est le rapport $\frac{aA}{OA}$.

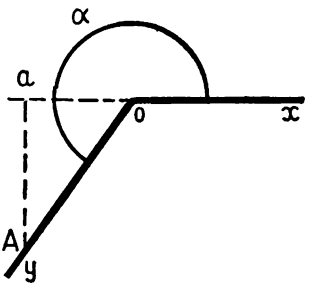


FIG. 7. — Le sinus de l'angle α compris entre 180° et 360° est encore le rapport $\frac{aA}{OA}$. Il est négatif.

3° De même pour un angle α supérieur à 180° (fig. 7), $\sin\alpha = \frac{aA}{OA}$, il est négatif puisque la longueur aA est dirigée vers le bas.

Quand un angle α croît à partir de 0, son sinus d'abord nul pour $\alpha = 0$ augmente jusqu'à 1 pour $\alpha = 90°$, puis diminue de 1 à 0 quand l'angle α passe de 90° à180°; le sinus décroît encore de 0 à — 1 quand l'angle augmente de 180° à 270°, puis croît de — 1 à 0 quand l'angle varie de 270° à 360°. La courbe représentant $\sin\alpha$ en fonction de α est identique à la figure 4, c'est une **sinusoïde**[1].

B. Le **radian** est l'unité d'angle employé en électricité, c'est l'angle au centre qui intercepte entre ses côtés *un arc dont la longueur est égale au rayon* (fig. 8).

Vous démontrerez facilement que :

360° valent 2 π radians ou 6,28 radians
180° — π — ou 3,14 —
90° — $\frac{\pi}{2}$ — ou 1,57 —

et que 1 radian vaut 180° : $\pi \simeq 57°17$.

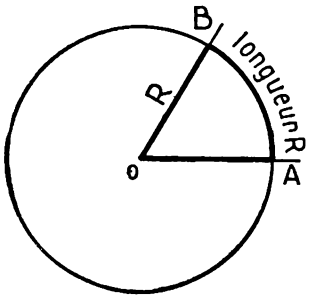


FIG. 8. — L'angle au centre AOB, qui intercepte sur la circonférence un arc dont la longueur est égale au rayon R, a pour mesure **1 radian.**

5. Formule représentant un courant alternatif sinusoïdal.

L'intensité i à l'instant t d'un courant sinusoïdal a pour valeur

$$i = I_m \sin \omega t,$$

l'angle ωt est exprimé en *radians*.

Que représente le nombre ω (oméga) qui se nomme la ***pulsation*** du courant?

1. Voir la table des valeurs des sinus des angles de 0 à 90°, page 516.

Vous savez qu'un courant alternatif reprend la même valeur après une période T, donc :

$$i = I_m \sin \omega t = I_m \sin \omega (t + T)$$

De cette égalité on tire

$$\sin \omega t = \sin \omega (t + T).$$

Or deux angles qui ont même sinus différent de 2 π *radians*,

$$\omega(t + T) - \omega t = 2\pi$$
$$\omega T = 2\pi$$
$$\omega = 2\pi : T \text{ } \textit{radians par seconde.}$$

La période T est l'inverse de la fréquence : $T = \frac{1}{f}$, par conséquent

$$\omega = 2\pi : \frac{1}{f}$$

$$\boxed{\omega = 2\pi f}$$

radian/seconde *hertz*

Pour un courant sinusoïdal de fréquence normale 50 Hz, la pulsation a pour valeur :

$$\omega = 2\pi \times 50 = 100\pi$$
$$= 314 \text{ } \textit{radians par seconde.}$$

Dans la formule $i = I_m \sin \omega t$, le temps t est compté à partir d'un instant où le courant est nul. Si nous exprimions le temps à partir d'un instant où le courant a sa valeur maximale, nous aurions $i' = I_m \cos \omega t$. Les expressions i et i' ci-dessus et les deux courbes correspondantes représentent le même courant, seule l'origine des temps change (fig. 9).

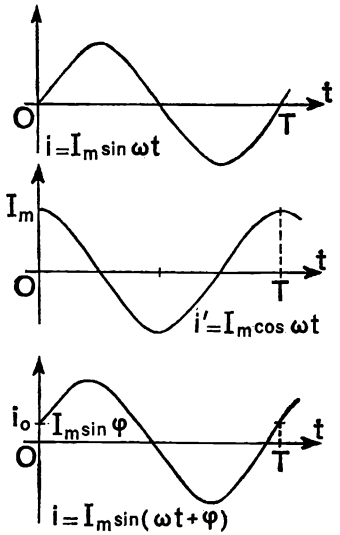


FIG. 9. — Le même courant peut être représenté par diverses formules suivant l'instant à partir duquel on mesure le temps.

Plus généralement, si l'on compte le temps à partir de l'instant où le courant a la valeur $i_0 = I_m \sin\varphi$, on peut représenter ce courant par la formule :

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

6. Représentation vectorielle.

Si l'on considère des courants sinusoïdaux ayant tous la même fréquence, par exemple 50 *hertz*, l'un particulier de ces courants

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

est déterminé par :

— sa **valeur maximale** I_m,

— l'angle φ appelé **phase** *à l'instant zéro* ou plus simplement phase.

On peut rappeler ces éléments sur un dessin figurant un vecteur $\overrightarrow{OA}$ tel que l'angle xOA soit égal à la phase φ et la longueur OA, mesurée à une certaine échelle, soit égale à la valeur maximale du courant I_m (fig. 10). Le vecteur $\overrightarrow{OA}$ est la **représentation vectorielle du courant** *i*.

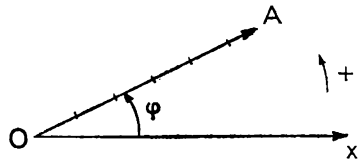


FIG. 10. — Représentation d'un courant simisoïdal par un **vecteur.**

Une tension sinusoïdale $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, de valeur maximale U_m et de phase φ, peut être également représentée vectoriellement. Il en est de même pour une f. é. m. sinusoïdale.

Ce procédé ne s'applique à plusieurs courants, plusieurs tensions que lorsqu'ils ont la **même fréquence,** donc la même pulsation.

7. Déphasage de deux grandeurs sinusoïdales de même fréquence.

1° La figure 11 représente avec les mêmes axes de coordonnées les courbes de deux courants sinusoïdaux de même fréquence. Les deux courants ne passent pas aux mêmes instants par leurs valeurs nulles et maximales : on dit qu'ils sont **déphasés** l'un par rapport à l'autre.

Parce qu'il passe par ses valeurs nulles et maximales **après** le courant A, le courant B est **déphasé en arrière** sur le courant A.

La formule du courant A est $i = I_m \sin \omega t$,

celle du courant B $\quad i' = I'_m \sin(\omega t - \varphi)$

le déphasage entre i et i' est φ *radians*. Il est *négatif* car le courant i' est négatif à l'instant zéro.

Le schéma figure 12 est la représentation vectorielle de ces deux courants.

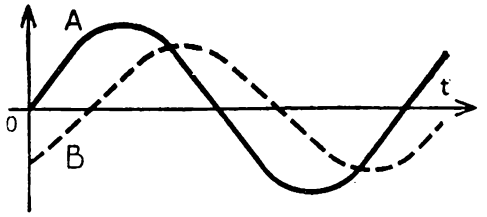


FIG. 11. — Le courant B est **déphasé** en arrière du courant A.

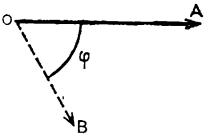


FIG. 12. — **Représentation vectorielle** correspondant à la figure 11.

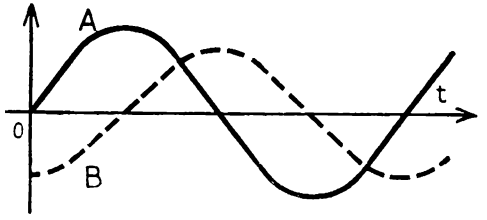


FIG. 13.
Les deux courants A et B sont **en quadrature.**

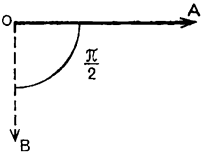


FIG. 14. — **Représentation vectorielle** de la figure 13.

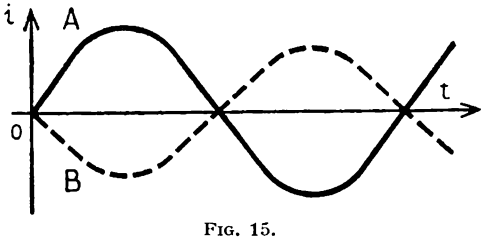


FIG. 15.
Les deux courants A et B sont **en opposition.**

FIG. 16. — **Représentation** vectorielle de deux courants en opposition.

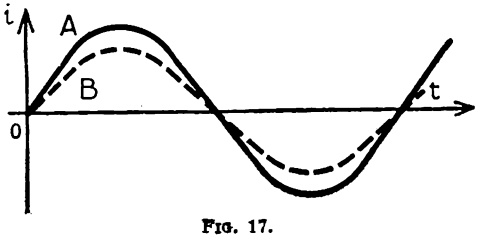


FIG. 17.
Les deux courants A et B sont en phase.

FIG. 18. — Représentation vectorielle de deux courants **en phase.**

2° Quand le déphasage est $\pi : 2$ *radians*, correspondant à un quart de période, les deux courants sont **en quadrature.**

Ils sont représentés par les formules :

$$i = I_m \sin \omega t \quad \text{et} \quad i' = I'_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

et les figures 13 et 14.

3° Quand le déphasage est π *radians*, correspondant à une demi-période, les deux courants sont **en opposition** (fig. 15 et 16). Leurs formules sont :

$$i = I_m \sin \omega t \quad \text{et} \quad i' = I'_m \sin(\omega t - \pi).$$

4° Quand il n'y a pas de déphasage, les courants sont en phase (fig. 17 et 18).

Les formules deviennent :

$$i = I_m \sin \omega t \quad \text{et} \quad i' = I'_m \sin \omega t.$$

5° Deux tensions u et u' peuvent également être déphasées l'une par rapport à l'autre. Plus généralement deux grandeurs sinusoïdales **de même fréquence,** une tension et un courant par exemple, peuvent être déphasées.

Si $u = U_m \sin \omega t$ et $i = I_m \sin \omega t$, on dit que la tension et le courant sont en phase.

Si $u = U_m \sin \omega t$ et $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, on dit que le courant est déphasé de φ *radians* en arrière de la tension.

8. Emploi de la représentation vectorielle.

Dans la plupart des problèmes de courants alternatifs, on est amené à faire la somme de courants ou de tensions, de **même fréquence,** mais de **phases différentes.** Algébriquement, le problème est long et difficile. Vectoriellement, c'est beaucoup plus facile en appliquant la règle suivante, connue sous le nom de **règle de Fresnel.**

La somme de deux grandeurs sinusoïdales de même fréquence est une grandeur sinusoïdale de même fréquence, représentée vectoriellement par la somme géométrique des vecteurs représentant les deux premières grandeurs.

Application numérique. — Soit deux dérivations parcourues par les courants $i_1 = 4 \sin \omega t$ et $i_2 = 5 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right)$. Cherchons le courant total i dans le circuit principal; c'est la somme des courants dérivés i_1 et i_2.

Adoptons une échelle pour les courants, par exemple 1 *cm* pour 1 *ampère* (fig. 19) :

— le vecteur $\overrightarrow{OA_1}$ représentant i_1 a une phase nulle, portons une longueur de 4 *cm* sur Ox;

— le vecteur $\overrightarrow{A_1A_2}$ représentant i_2 a une phase $\varphi = \pi : 3$ en retard sur i_1, traçons un vecteur $\overrightarrow{A_1A_2}$ de longueur 5 *cm* et faisant un angle de 60° avec Ox vers le bas (retard);

— le vecteur $\overrightarrow{OA_2}$, somme géométrique de $\overrightarrow{OA_1}$ et de $\overrightarrow{A_1A_2}$, représente vectoriellement i.

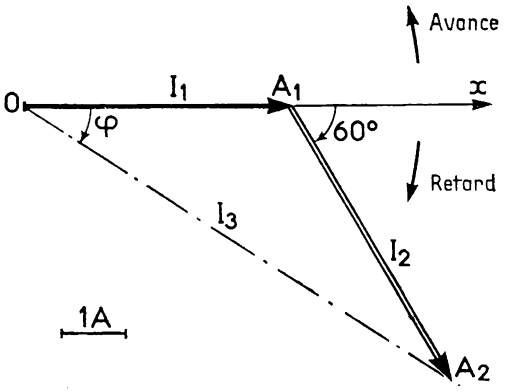


FIG. 19. — Emploi de la representation vectorielle.

Mesurons le segment OA_2 et l'angle φ; nous trouvons :

$$\overline{OA_2} = 8 \text{ cm} \qquad \text{et} \qquad \varphi = 32°.$$

On a donc :

$$I_m = 8 \text{ ampères} \qquad \varphi = \frac{32 \times 2\pi}{360} = \frac{8\pi}{45} \text{ radians.}$$

Soit :

$$i = 8 \sin\left(\omega t - \frac{8\pi}{45}\right) \text{ ampères.}$$

RÉSUMÉ

1. — On enregistre la courbe de l'intensité d'un courant alternatif avec un oscillographe. Cette courbe montre la *valeur maximale* du courant et les variations du *courant instantané* au cours d'une période.

2. — Quand la ressemblance de la courbe d'un courant alternatif avec une sinusoïde est grande, le courant est dit sinusoïdal.

Un courant sinusoïdal se représente non seulement par une courbe, mais aussi par une formule

$$i = I_m \sin \omega t$$

ou par un vecteur.

Le nombre $\omega = 2\pi f$ *radians par seconde* se nomme la *pulsation* du courant.

3. — Les f. é. m. et les tensions alternatives se représentent aussi par des courbes, des formules trigonométriques ou des vecteurs.

4 — Deux grandeurs sinusoïdales peuvent être *en phase* ou *déphasées*. Déphasées de $\pi : 2$ *radians*, elles sont en *quadrature*; déphasées de π *radians*, elles sont *en opposition*.

EXERCICES

1. Tracer la courbe représentant un courant sinusoïdal dont l'intensité maximale est 20 *ampères* et la fréquence 25 *hertz*. Calculer la pulsation de ce courant.

2. Tracer avec les mêmes axes de coordonnées les courbes de deux courants sinusoïdaux de fréquence 50 *p/s*. L'intensité maximale du courant A est 10 *A*, celle du courant B, 6 *A*. Le courant B est déphasé *en avant* du courant A de $\pi : 4$ *radians*. Ecrire les formules représentant ces courants. Représenter les deux courants par un schéma vectoriel.

3. Les courants i et i' dans deux dérivations ont respectivement : $I_m = 3$ A et $I'_m = 4$ A pour valeurs maximales.

Déterminer la valeur maximale du courant dans le circuit principal et le déphasage de ce courant par rapport au courant i, dans les cas suivants :

— i et i' sont en phase;
— i et i' sont en opposition;
— i' est en quadrature en avant de i;
— i' est déphasé de 120° en arrière de i.

4. Un courant a pour valeur $i = 2 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$.

Tracer son vecteur représentatif $\overrightarrow{OA}$ (échelle 1 A = 4 *cm*).

a) Projeter A en a sur l'axe Ox (origine des phases).

Mesurer et calculer le segment aA. Montrer que ce segment représente la valeur du courant à l'instant $t = 0$.

b) Calculer l'angle ωt pour $t = T : 4$. Faire tourner le vecteur $\overrightarrow{OA}$ de l'angle ainsi calculé. Déterminer alors le segment $\overline{aA}$. Que représente-t-il?.

c) En recommençant pour des instants T/6, T/3, T/2, 5 T/6... tracer par points la courbe représentant i.

Intensité efficace d'un courant alternatif.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Tous les ampèremètres et voltmètres que l'on possède, notamment un ampèremètre thermique.
Un rhéostat de lampes.
Un wattmètre.

LEÇON

A. — Appareils de mesure pour courant alternatif.

1. Ampèremètres et voltmètres thermiques.

a) Le fil de bronze AB s'échauffe quel que soit le sens du courant qui le parcourt (fig. 1). L'aiguille de l'instrument dévie donc quand l'appareil est traversé par du courant alternatif.

L'apport de chaleur dans le fil est à chaque instant proportionnel au carré du courant instantané. Pour une fréquence qui dépasse quelques périodes par seconde, la température du fil ne suit pas les variations du courant à cause de son inertie thermique. Elle prend une valeur moyenne, ainsi que l'allongement du fil qui en résulte. L'aiguille de l'instrument n'oscille pas

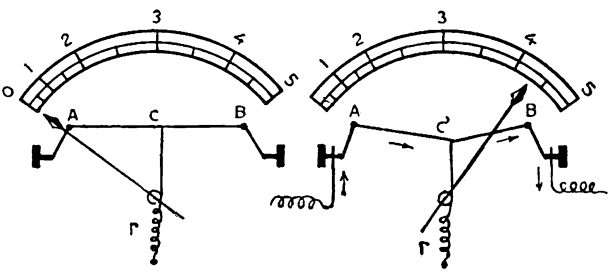


FIG. 1 — Schéma d'un **ampèremètre thermique.** A droite, le fil actif AB, parcouru par un courant, s'est allongé et l'aiguille s'est déplacée sur l'échelle de l'appareil.

sur l'échelle : les ampèremètres et voltmètres thermiques sont **apériodiques.**

Les ampèremètres et les voltmètres thermiques sont gradués avec du courant continu. L'action calorifique du courant étant proportionnelle au carré de l'intensité, la graduation des échelles de ces appareils est resserrée vers le zéro (fig. 2).

FIG. 2. — **Échelle d'un ampèremètre thermique.** Les lectures ne sont possibles qu'à partir du cinquième de la graduation.

b) Les ampèremètres thermiques s'emploient avec des shunts. Les résistances additionnelles des voltmètres sont en général extérieures aux appareils et portent des bornes correspondant à divers calibres de mesure.

c) Ampèremètres et voltmètres thermiques sont fragiles et peu fidèles. On ne les emploie guère que pour les courants à fréquence élevée.

2. Ampèremètres et voltmètres électromagnétiques.

a) La polarité des deux palettes de fer doux F et F′ (fig. 3) change de sens en même temps que le courant dans la bobine, mais les pôles en regard restent de même sens et se repoussent. Un ampèremètre ou un voltmètre électromagnétiques fonctionnent donc avec du courant alternatif.

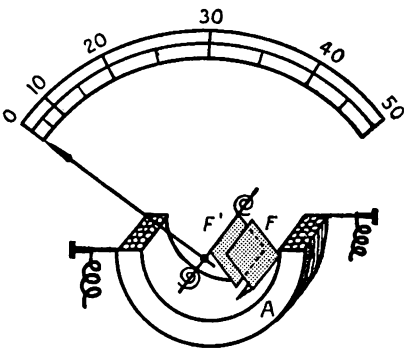
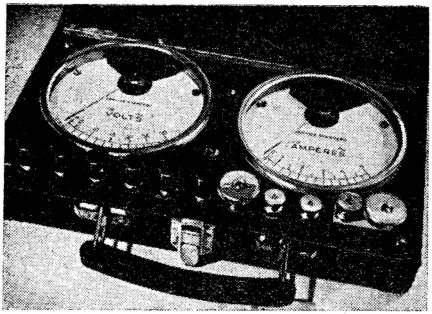


FIG. 3. — **Ampèremètre électromagnétique.** L'échelle est aussi resserrée vers le zéro.

Ils sont gradués avec du courant continu. La force de répulsion entre les palettes est fonction de l'induction dans chacune d'elles, soit du carré du courant dans la bobine. L'échelle des appareils est donc resserrée vers le zéro comme celle des appareils thermiques.

A cause de l'hystérésis du fer doux des plaquettes, l'aimantation est en retard sur le courant; c'est pourquoi les ampèremètres et voltmètres électromagnétiques portent souvent deux échelles, l'une pour le courant continu, l'autre pour le courant alternatif à la fréquence standard.

b) Pour amortir les oscillations de l'aiguille de part et d'autre de sa position d'équilibre, on la munit d'un amortisseur à air. C'est une petite plaque très légère, se déplaçant avec un jeu très faible dans une boîte presque complètement fermée. La résistance de l'air freine le mouvement de la plaquette et de l'aiguille (fig. 4).



Cliché Chauvin-Arnoux.

FIG. 4. — Mallette pour monteur, contenant **un voltmètre et un ampèremètre électromagnétiques.** Chacun des appareils possède 5 calibres de mesures. La boîte sert jusqu'à 600 *volts* et 150 *ampères*.

c) Différentes prises sur la bobine de l'appareil permettent plusieurs calibres de mesure pour le même ampèremètre.

Quelques constructeurs établissent des shunts pour leurs ampèremètres à fer doux.

Pour les voltmètres, il est facile de les construire avec plusieurs calibres de mesure en effectuant des prises sur la résistance additionnelle.

Les ampèremètres et voltmètres électromagnétiques sont robustes et très employés.

3. Voltmètres et ampèremètres électrodynamiques.

a) Un *voltmètre électrodynamique* (fig. 5) comprend une **bobine de champ,** fixe, divisée en deux parties, et un **cadre mobile,** monté sur pivots et rappelé à sa position de zéro par deux ressorts spiraux.

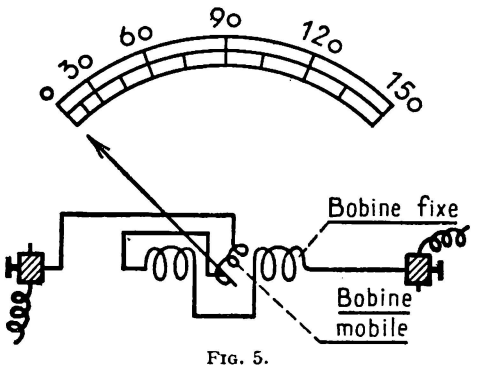


FIG. 5.
Schéma d'un **voltmètre électrodynamique.**

La bobine et le cadre sont en série et parcourus par le même courant. Le cadre mobile tend à tourner pour confondre son flux magnétique avec celui de la bobine fixe. Le sens de son mouvement reste le même quand le courant s'inverse à la fois dans les deux bobines. L'appareil fonctionne donc avec du courant alternatif comme avec du courant continu.

Les divisions de l'échelle sont resserrées vers le zéro.

Un amortisseur à air est nécessaire pour que l'aiguille prenne sa position d'équilibre sans nombreuses oscillations.

b) Dans le cas d'un *ampèremètre électrodynamique*, le courant à mesurer

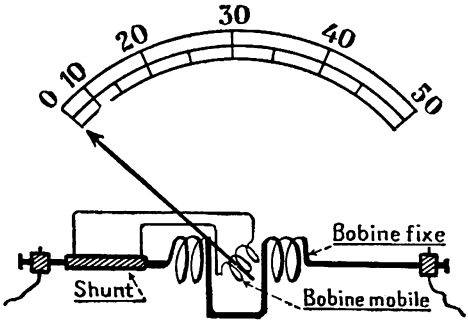


FIG. 6.
Schéma d'un **ampèremètre électrodynamique.**

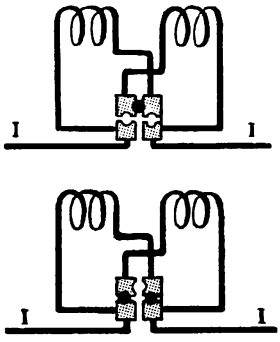


FIG. 7. — En haut, les bobines sont couplées **en série**; en bas, elles sont **en parallèle.**

passe tout entier dans la bobine fixe. Le cadre mobile, qui est fait de fil fin pour être léger, ne peut supporter que la fraction du courant total fournie par un shunt logé dans le boîtier de l'appareil (fig. 6).

c) Deux calibres de mesure, du simple au double, sont obtenus en couplant les deux moitiés de la bobine fixe en série ou en parallèle (fig. 7).

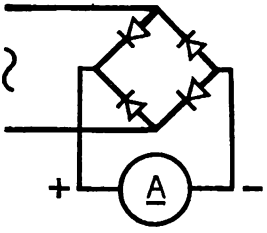


FIG. 8. — Montage d'un **redresseur** sur un ampèremètre polarisé. Le courant passe dans le sens de la pointe d'un élément redresseur.

4. Ampèremètres et voltmètres à cadre mobile et aimant fixe avec redresseur.

L'élément essentiel d'un **redresseur** [1] est une rondelle de cuivre rouge sur l'*une* des faces de laquelle on a formé de l'oxyde cuivreux Cu_2O. Cette rondelle laisse passer le courant dans le sens oxyde-cuivre, mais l'arrête dans le sens opposé.

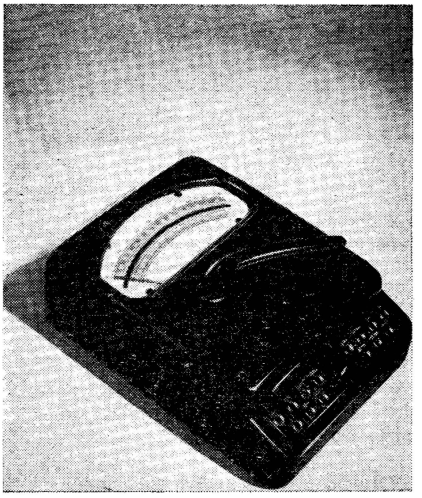
En superposant plusieurs de ces rondelles, on obtient un dispositif qui, placé dans un circuit à courant alternatif, ne laisse passer qu'une alternance à chaque période.

1. Voir 45e leçon.

Quatre redresseurs, montés suivant le schéma de la figure 8, laissent passer les deux alternances mais toujours dans le même sens. On obtient un courant qui est ondulé et capable de faire dévier l'aiguille d'un ampèremètre ou d'un voltmètre à cadre mobile et aimant fixe.

Des appareils modernes, à cadre mobile, aimant fixe et redresseur, servent à mesurer les tensions et les courants tant en courant continu qu'en courant alternatif. Celui que représente la figure 9 possède 6 calibres de mesure de courant et 6 de tension. Il mesure directement depuis 15 *milliampères* jusqu'à 15 *ampères* et depuis 3 *volts* jusqu'à 750 *volts*. En courant continu, il utilise des shunts sous 0,1 *volt*.

Il possède deux échelles. Vous remarquerez sur la figure 10 que ces échelles sont très différentes.



Cliché Chauvin-Arnoux.

FIG. 9. — Un type d'appareil moderne. Ce **compact universel** est caractérisé par sa multiplicité d'emplois. Il est à cadre mobile, aimant et redresseur. Il sert en courant continu et en courant alternatif comme voltmètre, milliampèremètre et ampèremètre.

5. Wattmètres.

En général, un ampèremètre et un voltmètre ne suffisent pas pour mesurer la puissance d'un récepteur ou d'un générateur à courant alternatif. Il faut se servir d'un **wattmètre.**

Les wattmètres les plus simples et les plus précis sont les wattmètres électrodynamiques.

FIG. 10. — Double échelle d'un appareil à redresseur pour courant continu et courant alternatif. Remarquez leurs différences.

Un tel wattmètre est construit tout à fait comme un ampèremètre électrodynamique. La bobine fixe A, faite d'un conducteur de grosse section, est mise **en série** avec le générateur ou le récepteur : c'est **la bobine de courant** (fig. 11). Le cadre mobile B, en fil

fin, auquel s'ajoute une résistance fixe de quelques milliers d'ohms, est branché **en dérivation** entre les bornes de l'appareil dont il s'agit de mesurer la puissance : c'est la **bobine de tension.**

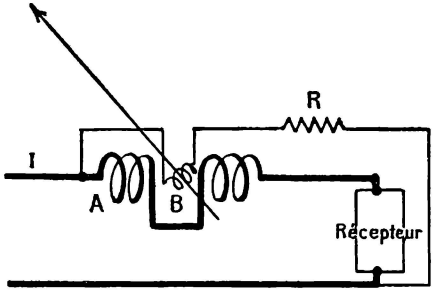
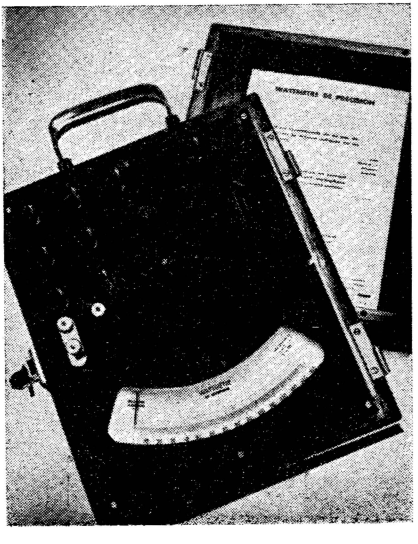


FIG. 11. — Schéma d'un **wattmètre électrodynamique.** La bobine de courant A est fixe, la bobine de tension B est mobile.

Lorsque le wattmètre est employé avec du *courant continu*, le courant I passe dans la bobine fixe, le courant dans le cadre mobile est proportionnel à la tension U. Le cadre mobile tourne, les deux spiraux s'opposent à son mouvement et l'arrêtent dans une position qui dépend du produit UI, c'est-à-dire de la puissance. Cette puissance peut être mesurée en même temps avec un voltmètre et un ampèremètre. On gradue ainsi l'échelle du wattmètre en *watts* ou en *kilowatts*.

Quand le wattmètre est monté dans un circuit à *courant alternatif*, à chaque instant le cadre mobile tend à tourner sous l'action d'un couple proportionnel à la puissance instantanée. Pour une fréquence du courant et de la tension assez grande (supérieure à 10 ou 15 *périodes par seconde*), l'aiguille n'oscille pas et prend une position moyenne qui indique la valeur de la puissance mesurée.

Un wattmètre peut être considéré comme la réunion en un même instrument d'un ampèremètre et d'un voltmètre. La *bobine de courant* joue le rôle d'*ampèremètre :* elle est placée en ***série*** dans le circuit. La *bobine de tension* correspond à un *voltmètre :* elle est montée ***en dérivation*** aux bornes de l'appareil dont on mesure la puissance.



Cliché Chauvin-Arnoux.

FIG. 12.
Wattmètre électrodynamique de contrôle.

La figure 12 est la photographie d'un wattmètre de contrôle. Ce wattmètre possède deux sensibilités de courant, obtenues par le couplage en série ou en parallèle des deux moitiés de la bobine fixe, et six sensibilités de tension par des prises effectuées sur la résistance additionnelle du cadre mobile, soit douze calibres de mesure.

La figure 13 montre le symbole employé pour figurer un wattmètre dans un schéma électrique.

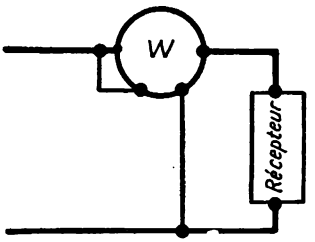


FIG. 13. — Symbole d'un **wattmètre** dans un schéma électrique.

B. — Intensité efficace d'un courant alternatif

6. Définition du courant efficace.

Installons un *ampèremètre thermique* en série avec un récepteur fonctionnant avec du courant alternatif (radiateur, lampes ou rhéostat).

L'instrument indique un certain courant, soit 6 *ampères*. Ce courant est le même que celui qu'indiquerait l'ampèremètre s'il était parcouru par un courant continu y dégageant la même quantité de chaleur pendant le même temps. On lui donne le nom **de courant efficace.**

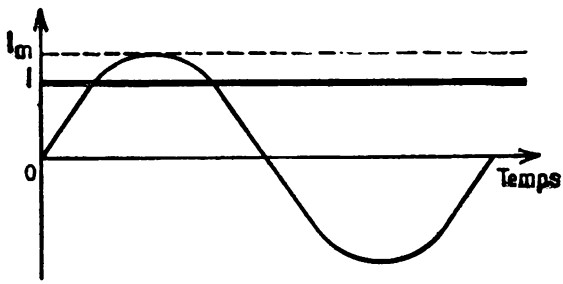


FIG. 14. — Le courant continu d'intensité $I = I_m : \sqrt{2}$ produit les mêmes effets calorifiques que le courant sinusoïdal représenté : I est l'**intensité efficace** du courant sinusoïdal.

Ainsi **l'intensité efficace d'un courant alternatif est l'intensité du courant continu qui dégage la même quantité de chaleur dans les mêmes conditions** (même résistance du conducteur, même durée de passage du courant).

On la représente par la lettre I.

7. Valeur de l'intensité efficace d'un courant alternatif.

On démontre que **l'intensité efficace d'un courant alternatif sinusoïdal est égale à la valeur maximale du courant divisée par** $\sqrt{2}$ (fig. 14).

$$\boxed{I = I_m : \sqrt{2}}$$

soit $$I = 0{,}707\ I_m.$$

Nous pouvons vérifier graphiquement cette formule.

A partir de la sinusoïde (fig. 15), représentant le courant sinusoïdal $i = I_m \sin \omega t$, traçons la courbe de

$$i^2 = I^2_m \sin^2 \omega t.$$

Pour obtenir un point de cette courbe d'abscisse t, nous mesurons la valeur i pour cette abscisse, nous calculons i^2 et nous traçons une ordonnée ayant à l'échelle la longueur i^2.

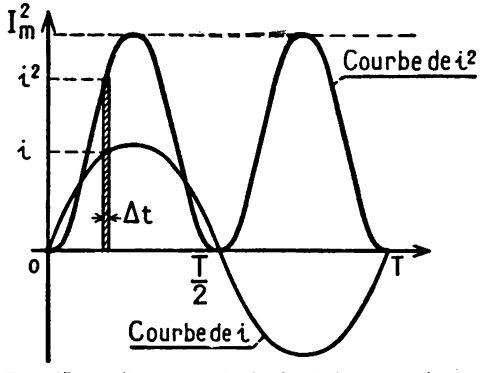


FIG. 15. — Le rectangle hachuré $i^2\ \Delta t$ représente l'énergie calorifique produite pendant le temps Δt par le courant sinusoïdal dans une résistance de 1 *ohm*.

Supposons à l'instant t un intervalle de temps Δt assez petit pour que l'on puisse admettre que i ne change pas durant cet intervalle. L'énergie calorifique dégagée par le courant pendant cet intervalle dans une résistance de 1 *ohm* est représentée par la surface $i^2 \Delta t$ du rectangle extrêmement étroit ayant pour longueur i^2 et pour largeur Δt.

Imaginons que nous répétions cette construction pour un grand nombre de points pris sur l'axe des abscisses, nous arriverons à la conclusion que la chaleur dégagée par le courant sinusoïdal d'intensité maximum I_m pendant une période T est figurée, à une certaine échelle, par la surface hachurée comprise entre la courbe OABCD et l'axe des abscisses (fig. 16).

Pour évaluer cette surface, traçons par le milieu de OA′ la parallèle EF à OD, (fig. 17).

$$OE = OA' : 2 = I^2_m : 2.$$

Les surfaces hachurées 1 et 1′, 2 et 2′, etc., au-dessous et au-dessus de cette droite sont égales. Donc la surface du rectangle OEFD est équivalente à la surface OABCD. Elle a pour valeur

$$OE \times OD = \frac{I^2_m}{2} \times T.$$

Elle représente la chaleur dégagée par le courant pendant une période dans une résistance de 1 *ohm*.

Or, d'après la définition du courant efficace I, cette énergie calorifique est aussi :

$$I^2 \times T.$$

Donc $I^2 \times T = \frac{I^2_m}{2} \times T$

d'où $I^2 = I^2_m : 2$

et $I = I_m : \sqrt{2}$.

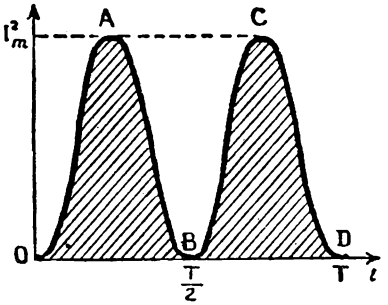


FIG. 16. — L'énergie calorifique produite par un courant sinusoïdal de valeur maximale I_m dans une résistance de 1 *ohm*, pendant une période T, est représentée par la surface hachurée OABCD.

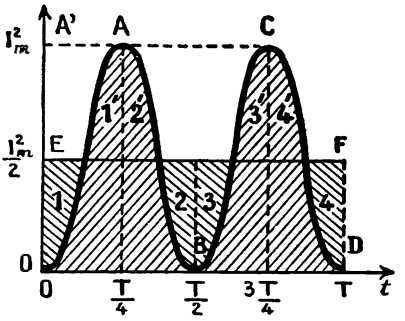


FIG. 17. — La surface OABCD est équivalente à la surface du rectangle OEFD; elle a donc pour valeur $I^2_m \times T$.

8. Importance de la valeur efficace du courant.

C'est le courant indiqué par les ampèremètres à courant alternatif quand on effectue des mesures.

Lorsqu'on mentionne, sans autre précision, l'intensité d'un courant alternatif, c'est toujours de la valeur efficace qu'il s'agit. Pratiquement, on sous-entend le mot efficace.

La valeur maximale n'est à considérer que s'il s'agit d'aimantation, de production d'une induction ou d'un flux magnétique.

C. — F. é. m. et tensions efficaces.

En montant un voltmètre thermique entre deux points A et B d'un circuit à courant alternatif, il indique une tension que l'on nomme **tension efficace** entre les points A et B. On la représente par U.

Entre la *tension efficace* U et la *tension maximale* existe la relation

$$U = U_m : \sqrt{2}$$

s'il s'agit d'une tension sinusoïdale.

De même entre les bornes d'un alternateur, un voltmètre thermique

mesure une **f. é. m. efficace** E, qui est égale au quotient de la *f. é. m.* maximale par V2 dans le cas d'une f. é. m. sinusoïdale.

$$E = E_m : \sqrt{2}$$

RÉSUMÉ

1. — Les ampèremètres thermiques, électromagnétiques, électrodynamiques et les ampèremètres à cadre mobile, aimant fixe et redresseurs fonctionnent sous l'action d'un courant alternatif.
Il existe des voltmètres des mêmes modèles.

2. — Pour mesurer la puissance d'un générateur ou d'un récepteur à courant alternatif, on se sert de *wattmètres*.

3. — La valeur *efficace* I d'un courant alternatif est égale à l'intensité du courant continu qui dégage la même quantité de chaleur dans la même résistance pendant le même temps.
Sa valeur par rapport au courant maximal est :

$$I = I_m : \sqrt{2}.$$

4. — La *tension efficace* U et la *f. é. m. efficace* E sont liées respectivement à la *tension maximale* U_m et à la *f. é. m. maximale* E_m par les relations :

$$U = U_m : \sqrt{2}, \quad E = E_m : \sqrt{2}.$$

EXERCICES

1. Faut-il prévoir les lignes et les coupe-circuit fusibles d'une installation à courant alternatif pour le courant maximal ou pour le courant efficace?

2. Quelle est la tension maximum entre les deux câbles d'un transport d'énergie électrique par courant alternatif à 220 000 *volts?*

3. Un wattmètre possède deux sensibilités de courant : 5 et 10 *ampères,* et trois sensibilités de tension : 75, 150 et 300 *volts.* Son échelle porte 150 divisions. Quelle est la puissance en *watts* mesurée par une division de l'échelle dans les six calibres de mesure de l'instrument?

4. Deux courants sinusoïdaux de même fréquence et de même valeur 20 *A* sont déphasés l'un par rapport à l'autre de $2\pi : 3$ (120° ou 1/3 de période). Déterminer le courant résultant.
(Substituer les valeurs efficaces aux valeurs maximales, c'est seulement changer l'échelle de la représentation vectorielle.)

Réponse : 20 *ampères.*

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

Wattmètre. — Un wattmètre est indispensable parmi les instruments de mesure d'un cours d'électricité industrielle.

Mais les fonds pour se le procurer peuvent manquer pendant quelque temps. On le remplacera provisoirement, pour les expériences de cours, par un électrodynamomètre-balance, facile à construire, mais qui n'indique pas, par une lecture directe, la puissance mesurée.

Une bobine B, de 20 *cm* de diamètre, de 500 *g* de fil très fin (15/100), est suspendue à un plateau d'une balance (fig. 18). Sa résistance est d'environ 3 000 *ohms*. C'est la **bobine de tension.** Une tare ramène la balance à sa position de zéro.

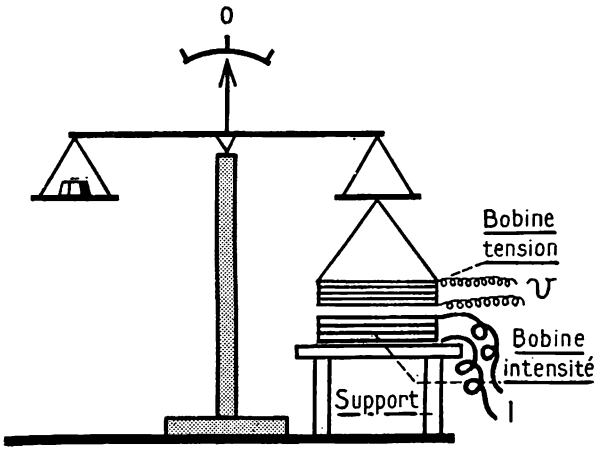


FIG. 18. — **Électrodynamomètre-balance** servant de wattmètre.

Une autre bobine B′, de même diamètre, de 60 spires de fil de 20/10, est placée sur un support en bois qui la fixe dans une position bien déterminée très près de la bobine B. C'est la **bobine d'intensité.**

Pour étalonner l'appareil, on fait passer dans la bobine B′ un courant continu I, d'intensité connue; on branche la bobine B par deux longs fils de 15/100, boudinés pour être très flexibles, sur une tension continue U mesurée avec un bon voltmètre. Le sens de branchement est tel que les deux bobines se repoussent. On ramène la balance au zéro à l'aide d'une surcharge *p*. Ce poids *p* caractérise la puissance $P = UI$.

On fait varier P et l'on mesure diverses valeurs correspondantes de P et de *p*. On construit la courbe de P en fonction de *p*. Cette courbe d'étalonnage, qui est une droite, vaut à condition de replacer toujours les deux bobines dans la même position, c'est-à-dire l'aiguille de la balance à zéro.

L'appareil est évidemment moins commode qu'un wattmètre à lecture directe, mais il suffit pour effectuer quelques expériences quantitatives.

Emploi d'un compteur comme wattmètre. — Cet emploi est possible quand la puissance à mesurer reste constante pendant la durée de la mesure.

Un compteur ordinaire mesure l'énergie fournie à un récepteur pendant un certain temps, soit *Wh watts-heures* en *t* secondes.

Le nombre de watts-heures s'obtient, soit en lisant les indications des cadrans de l'appareil au début et à la fin de l expérience, soit, pour une plus grande précision, en comptant le nombre de tours effectués par le disque-frein et en multipliant ce nombre par la constante k inscrite sur la plaque du compteur.

La durée t *secondes* de la mesure est déterminée avec un chronographe.

La puissance cherchée est :

$$P = \frac{Wh \times 3600}{t} \text{ watts.}$$

EXERCICES DE RÉVISION

1. Une installation à courant continu est alimentée par une ligne à trois fils. La résistance de chacun des deux fils principaux est 1 Ω; celle du fil d'équilibre, 2 Ω.

Au départ de la ligne, on maintient des tensions constantes de + 110 V et — 110 V entre le fil d'équilibre et chacun des fils principaux, soit 220 V entre ces derniers.

A l'arrivée de la ligne, sont connectées sur l'un des ponts une résistance de 15 Ω et sur l'autre une résistance de 20 Ω.

1° Quelles sont les courants dans chacun des fils?

2° Quelles sont les tensions aux bornes des résistances?

3° Que deviennent ces tensions quand le fil d'équilibre est coupé?

Réponses : 6,7 A; 1,335 A; 5,365 A; — 100,5 V; 107,3 V; — 89,1 V; 118,8 V.

2. Une batterie d'accumulateurs de 60 éléments est chargée à la tension moyenne de 2,25 V par élément pendant toute la charge. Un compteur monté sur la ligne d'alimentation indique que la batterie a absorbé 222 *Ah.*

Quelle est, en watts-heures, l'énergie fournie à la batterie pendant la charge?

La décharge de la batterie s'effectue à la tension moyenne de 1,98 V par élément. La quantité d'électricité restituée est 200 *Ah.*

Quelle est, en watts-heures, l'énergie fournie par la décharge?

Calculer le rendement en quantité de la batterie, puis le rendement en énergie.

La charge dure 10 *heures.* Quelle est la puissance de la dynamo employée à la charge?

Le rendement de cette génératrice est 0,78. Elle est entraînée par un moteur dont le rendement est 0,82. Déterminer la puissance totale employée à la charge.

Calculer le rendement de l'ensemble moteur-dynamo-batterie.

Réponses : 29 970 Wh; 23 760 Wh; — 0,90; 0,78; — 3 kW; — 4,7 kW; — 0,50.

Circuit parcouru par un courant alternatif.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un rhéostat de 10 *ohms.*
Une bobine de self (carcasse de transformateur — bobine de 360 ***spires*** *— **bobine** de* 180 *spires).*
Un rhéostat de lampes (8 *lampes de* 60 watts, 115 volts).
Un voltmètre 150 volts.
Un ampèremètre 15 ampères.

LEÇON

A. — Portion de circuit seulement résistante.

1. On démontre que :

1° La tension efficace U, le courant efficace I, la résistance R sont liées par la relation

$$I = \frac{U}{R}$$

volts / *ampères* *ohms*

2° La puissance dépensée dans le circuit est

$$P = U \times I = RI^2$$

watts *volts* *ampères*

3° Le courant et la tension sont en phase.

2. Vérifions ces résultats.

Les résistances et rhéostats métalliques, les lampes à incandescence n'ont qu'une inductance négligeable, ce sont des **résistances pures**,

on dit parfois des **résistances mortes.** On représente de telles résistances par le symbole de la figure 1.

Aux bornes d'un rhéostat de 10 *ohms*, appliquons la tension alternative du réseau, un ampèremètre et un voltmètre sont mis dans le circuit (fig. 2).

FIG. 1. — Symbole d'une **résistance sans self-induction.**

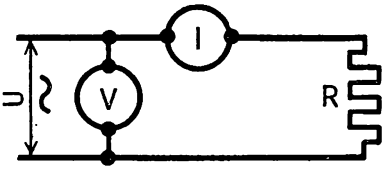


FIG. 2. — Portion de circuit constituée par une **résistance pure.**

a) ***Valeur du courant.*** — Le voltmètre indique 115 *volts* l'ampèremètre 11,5 *ampères*. La loi d'Ohm U = RI s'applique donc dans le cas d'un courant alternatif parcourant une résistance morte comme dans le cas d'un courant continu.

b) ***Valeur de la puissance.*** — Comme un courant continu d'intensité I un courant alternatif de valeur *efficace* I dégage dans une résistance R une puissance

$$P = RI^2$$

ou en remplaçant RI par U :

$$P = UI.$$

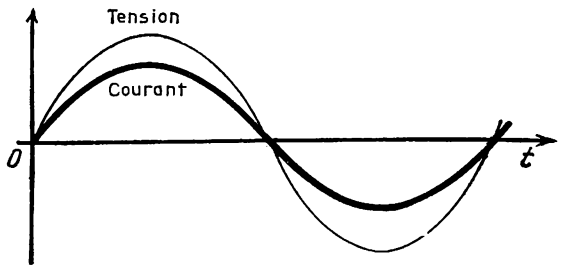


FIG. 3. — Dans une résistance pure, **le courant et la tension sont en phase.**

c) ***Concordance de phase du courant et de la tension.*** — Avec un oscillographe double il est possible d'enregistrer à la fois la courbe de courant et celle de la tension. On obtient deux sinusoïdes en phase (fig. 3).

3. La puissance fournie par le réseau à une résistance pure est pulsatoire.

Dans la figure 4 la tension aux bornes de la résistance est représentée par la courbe 1, le courant par la courbe 2.

A partir de ces deux courbes traçons celle de la puissance *ui*.

Nous obtenons un point quelconque de cette courbe, par exemple celui qui correspond à l'instant *t*, en mesurant sur le dessin *u* et *i* pour l'abscisse *t* et en traçant, à cette même abscisse, une ordonnée de longueur *ui*.

La figure montre que la puissance instantanée dans la résistance oscille entre les valeurs zéro et $U_m I_m$ avec une fréquence double de celle du courant et de la tension. On dit que cette puissance est **pulsatoire.**

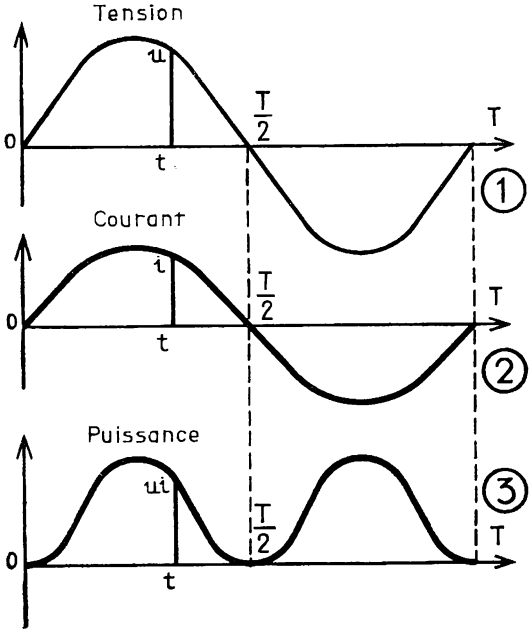


FIG. 4. — Construction de la courbe de la **puissance instantanée** dans une résistance pure. Cette puissance est pulsatrice.

B. — Portion de circuit constituée par une bobine d'auto-induction.

4. Rappelons ce qu'est la self-induction d'une bobine.

Vous avez vu dans la 24e leçon que *c'est la propriété que possède une bobine, avec ou sans noyau de fer, de s'opposer aux variations du courant qui la parcourt.*

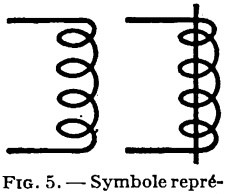


FIG. 5. — Symbole représentant une **bobine**, à gauche sans fer, à droite avec noyau de fer.

L'*auto-induction* d'une bobine — on dit aussi l'induction propre — résulte de la variation du flux qui la traverse quand l'intensité du courant change dans l'enroulement.

Cette variation produit une *f. é. m.* qui s'oppose (loi de Lenz) à la croissance du courant ainsi qu'à sa décroissance.

On représente une portion de circuit possédant de l'auto-induction par les symboles de la figure 5.

5. Unité de coefficient d'auto-induction ou inductance propre.

L'unité d'inductance est l'**henry** (H). C'est *l'inductance d'un circuit fermé dans lequel une f. é. m. de* 1 volt *est produite lorsque le courant électrique qui parcourt le circuit varie uniformément de* 1 ampère *par* seconde.

Pour produire une f. é. m. de 1 *volt* le flux supprimé en 1 *seconde* doit être 1 *wéber*. Donc dans un circuit dont la self-induction est 1 *henry* un courant de 1 *ampère* crée un flux de 1 *wéber*.

Un circuit dans lequel un courant de 1 *ampère* produit Φ *wébers* a une inductance de Φ *henrys*. Quand I *ampères* sont nécessaires pour obtenir ce flux Φ la self-induction du circuit est I fois plus faible.

Ainsi *le coefficient d'auto-induction d'une bobine dans laquelle un courant de I ampères produit un flux de* Φ wébers *a pour valeur* :

$$L = \frac{\Phi}{I} \begin{matrix} \textit{wébers} \\ \textit{ampères} \end{matrix} \textit{henrys.}$$

a) Dans le cas d'une **bobine sans fer**, longue par rapport à son diamètre, de *s mètres carrés* de section, de *l mètres* de longueur, ayant n_1 spires par mètre, vous avez vu (21e leçon) qu'un courant de *I ampères* produit une induction de $1{,}25\, n_1 I . 10^{-6}$ *teslas* et un flux de $1{,}25\, n_1 IS . 10^{-6}$ *wébers*. Le flux qui traverse l'ensemble des $n_1 l$ spires de l'enroulement est

$$\Phi = 1{,}25\, n_1^2\, I\, l\, s\, 10^{-6} \textit{ wébers.}$$

L'inductance de la bobine a pour valeur

$$L = \Phi : I = 1{,}25\, n_1^2\, l\, s\, 10^{-6} \textit{ henrys.}$$

On peut aussi écrire, en désignant par $n = n_1 l$ le nombre total de spires de la bobine :

$$L = \frac{1{,}25\, n^2\, s}{l} \times 10^{-6} \textit{ henrys.} \qquad (1)$$

Remarquez :

1° que l'inductance est indépendante de l'intensité du courant; c'est un facteur caractéristique de la bobine;

2° qu'elle est proportionnelle au carré du nombre de spires de la bobine.

b) Si la bobine possède un **noyau de fer**, fermé sur lui-même, un courant de I *ampères* y produit un flux de $\frac{1{,}25\, n I\, s\, \mu}{l . 10^6}$ *wébers*, μ étant la perméabilité du fer.

Le flux qui traverse l'ensemble des n spires de l'enroulement est

$$\Phi = \frac{1{,}25\, n^2\, I\, s\, \mu}{l} \times 10^{-6} \textit{ wébers}$$

et l'inductance pour la valeur

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{1{,}25\, n^2\, s\, \mu}{l \times 1\,000\,000} \textit{ henrys.}$$

Remarquez :

1° que l'inductance est encore proportionnelle au carré du nombre de spires;

2° qu'elle dépend de la perméabilité du noyau, et par conséquent de l'intensité du courant aimantant.

L'inductance d'une bobine à noyau de fer n'est donc pas constante comme celle d'une bobine sans fer.

6. L'henry est une unité dont la valeur est grande.

Pour en avoir une idée, *calculons la longueur d'une bobine sans fer ayant une inductance de* 1 henry, *la section de cette bobine est* 100 cm² *et elle compte* 20 *spires par centimètre, soit* 2 000 *spires par mètre.*

D'après la formule (1) on doit avoir :

$$1 = 1{,}25 \times 2\,000^2 \times l \times 0{,}01 \times 10^{-6}.$$

Donc :

$$l = \frac{1\,000\,000}{1{,}25 \times 4.10^6 \times 0{,}01} = \frac{100}{5}$$

$$= 20 \text{ } \textit{mètres}.$$

7. Dans une bobine de résistance négligeable et d'inductance L henrys parcourue par un courant alternatif de pulsation ω :

1° La tension U, le courant I, l'inductance L sont liées par la relation

$$I = \frac{U}{L \times \omega}$$

volts / *ampères henrys radians/s*

2° La puissance dépensée dans la bobine est nulle.

3° Le courant est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de la tension.

8. Vérifions ces résultats.

La bobine d'auto-induction employée est une bobine de 360 spires-enfilée sur la carcasse d'un transformateur démontable formant un circuit magnétique fermé. Sa résistance ohmique d'environ 1,5 *ohm* est négligeable dans nos expériences qui ne sont pas très précises. Son inductance, dans les conditions de son emploi, est environ 0,26 *henry*.

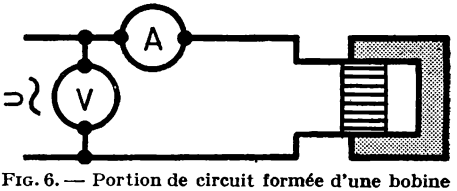


FIG. 6. — Portion de circuit formée d'une bobine possédant une **self-induction importante** mais peu résistante.

Nous appliquons aux bornes de la bobine la tension de 115 *volts* du secteur alternatif sont la fréquence est 50 *périodes par seconde.* Un ampèremètre et un voltmètre sont placés dans le circuit (fig. 6).

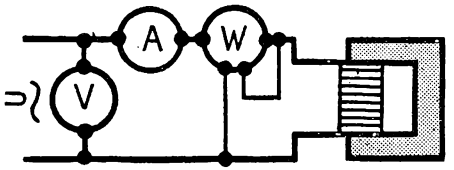


FIG. 7.
Un wattmètre est introduit dans le circuit.

1° ***Courant.*** — Pour une tension de 115 *volts* le courant est seulement 1,4 *ampère.*

L'effet de l'auto-induction de la bobine est de réduire le courant comme le ferait une résistance de

$$115 : 1\,4 = 82 \text{ ohms.}$$

On dit que la bobine introduit dans le circuit une **réactance** de 82 *ohms.*

Cette *réactance* a pour valeur $L\,\omega$. En effet :

$$L\,\omega \simeq 0\,26 \times 314 \simeq 82.$$

Remarquez que la réactance, qui joue dans le circuit le rôle d'une résistance, est proportionnelle à la fréquence du courant puisque

$$\omega = 2\,\pi f.$$

2° ***Puissance.*** — Un wattmètre placé dans le circuit (fig. 7) ne dévie pas de façon appréciable. *La bobine ne consomme pas de puissance.*

Pourtant elle absorbe 1,4 *ampère* sous 115 *volts.* On donne au produit

$$UI = 115 \times 1{,}4 = 161$$

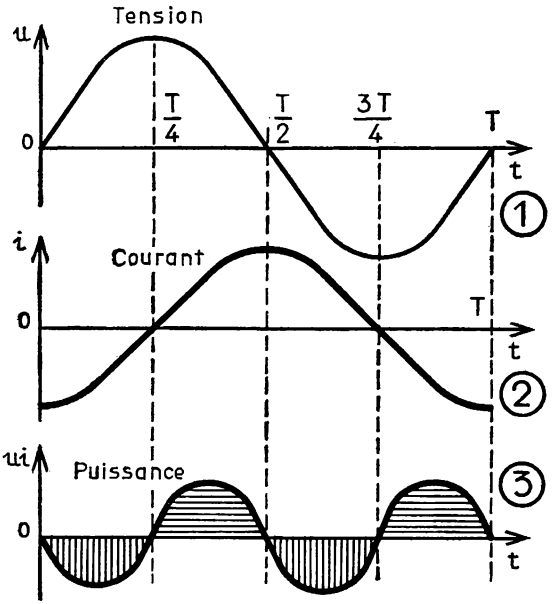


FIG. 8. — Construction de la courbe de la **puissance instantanée** dans une bobine. Cette puissance est sinusoïdale de fréquence $2f$ *p/s.* La puissance moyenne est nulle.

le nom de **puissance apparente** et on l'exprime en *volts-ampères* (*VA*).

La puissance apparente de la bobine est donc $P_a = 161$ *volts ampères* et sa puissance réelle P *watts* est nulle.

3° ***Déphasage du courant sur la tension.*** — Avec un oscillographe on constate que le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ (90°, 1/4 de période) *en arrière* de la tension (fig. 8).

Courant et tension dans une inductance pure sont en quadrature.

La cause de ce déphasage est la production d'une f. c. é. m. dans la bobine. A chaque période, cette f. c. é. m. retarde la croissance du courant, et retarde aussi sa décroissance.

9. Le déphasage en quadrature explique que la puissance consommée est nulle.

La figure 8 réunit la courbe de la tension 1 et celle du courant 2. A partir de ces deux courbes, nous avons tracé celle de la puissance instantanée *ui* dans la bobine au cours d'une période.

Dans le premier et le troisième quart d'une période, cette puissance est négative. Pendant le second et le quatrième quart, elle est positive. La bobine fonctionne alternativement comme un *générateur* et comme un *récepteur*. Dans la figure, les surfaces hachurées sont égales, l'énergie restituée est égale à l'énergie absorbée, la puissance moyenne est nulle,

Une bobine soumise à une tension alternative est comparable à un ressort soumis à une force alternative. Quand la force croît, le ressort se comprime et absorbe de l'énergie mécanique; quand la force décroît, le ressort se détend et restitue cette énergie.

Dans un circuit à courant alternatif, une bobine d'auto-induction réduit l'intensité du courant à cause de sa réactance. A la différence d'une résistance ohmique qui donnerait le même résultat, elle ne produit pas de perte d'énergie. Aussi dans certains cas remplace-t-on avantageusement, dans un circuit à courant alternatif, les résistances de réglage par des bobines.

C. — Portion de circuit composée d'une résistance et d'une inductance en série.

10. Expérience.

Mettons en série un rhéostat de lampes AB et une bobine BC (bobine de 180 spires sur la carcasse du transformateur démon-

table). Un ampèremètre, un wattmètre et des voltmètres sont placés dans le circuit (fig. 9).

Branchons l'ensemble sur le secteur à 50 *hertz*.

Les mesures donnent les valeurs suivantes :

tension entre les bornes extrêmes A et C : $U = 115$ *volts*,
tension entre les bornes A et B de la résistance : $U_1 = 87$ *volts*,
tension entre les bornes B et C de l'inducteur : $U_2 = 75$ *volts*,
courant dans le circuit : $I = 3$ *ampères*,
puissance indiquée par le wattmètre : $P = 261$ *watts*.

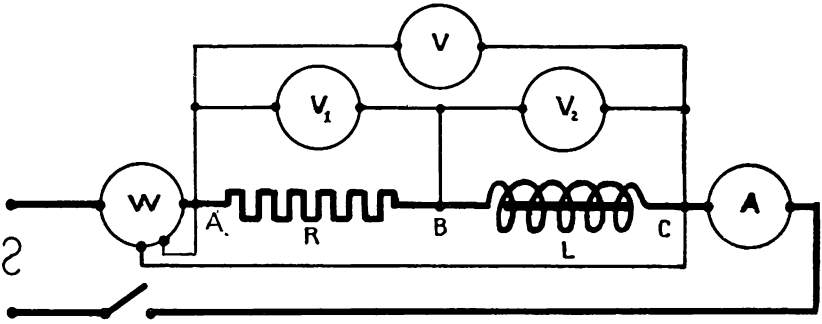


FIG. 9. — Portion de circuit composé d'une **résistance** R et d'une **inductance** L en série.

Vous remarquez que :

1° La tension U entre les bornes A et C est inférieure à la somme arithmétique des tensions partielles U_1 entre A et B et U_2 entre B et C, *les tensions U_1 et U_2 ne sont pas en phase.*

2° La puissance mesurée P = 261 *watts* est inférieure au produit UI = 345 de la tension par le courant absorbé.

On peut calculer un nombre k inférieur à 1 tel que :

$$P = kUI,$$

ce nombre k, qui diffère suivant les circuits, se nomme **facteur de puissance.**

La puissance P, exprimée en watts, est la **puissance réelle;** le produit UI se nomme **puissance apparente** et s'évalue en *volts-ampères.*

Dans l'expérience effectuée, la puissance apparente est

$$P_a = 115 \times 3 = 345 \text{ volts-ampères},$$

la puissance réelle mesurée par le wattmètre P = 261 *watts* et le facteur de puissance est $k = 261 : 345 \simeq 0{,}75$.

11. Diagramme vectoriel pour la portion de circuit AC.

La valeur de la résistance AB est R, celle de la réactance de BC est $L\omega$, l'intensité du courant est I.

Entre les points A et B, la tension est RI en phase avec le courant I. Nous représentons cette tension par le vecteur $\overrightarrow{AB}$ (fig. 10).

Entre B et C, la tension est $L\omega I$, déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en avant de I, donc de RI. Nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{BC}$ perpendiculaire à $\overrightarrow{AB}$.

La résultante de ces deux vecteurs est $\overrightarrow{AC}$ qui représente U, tension entre A et C.

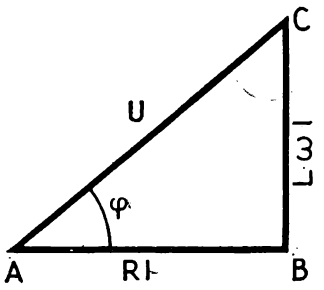


FIG. 10. — Diagramme des tensions dans le montage de la fig. 9

a) Dans le triangle rectangle ABC,

$$\overline{AC}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{BC}^2.$$

Donc

$$U^2 = R^2 I^2 + L^2 \omega^2 I^2$$

$$= I^2 (R^2 + L^2 \omega^2)$$

$$\boldsymbol{U = I \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}.$$

A la grandeur $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$, analogue à une résistance ohmique, on donne le nom d'**impédance;** on l'exprime en *ohms* et on la représente par la lettre Z.

La formule $U = I \times Z$ ressemble tout à fait à la formule d'Ohm.

b) La tension U est déphasée en avant de RI de l'angle φ. Dans le triangle rectangle ABC, l'angle φ est déterminé par la relation

$$tg\varphi = \frac{BC}{BA} = \frac{L\omega I}{RI} = \frac{L\omega}{R}.$$

La tangente de l'angle de déphasage φ est donc égale au rapport de la *réactance* et de la *résistance* du circuit.

12. Le diagramme vectoriel fournit aussi la valeur de la puissance dépensée dans la portion de circuit.

Multiplions par I les trois côtés du triangle de la figure 10. Ils deviennent $L\omega I^2$, RI^2 et UI. Le triangle obtenu est semblable au précédent, il est rectangle (fig. 11).

La puissance $L\omega I^2$ se nomme **puissance réactive** ou **puissance magné-**

tisante, on la désigne par P_r. Elle correspond au flux alternatif dans la bobine.

La puissance RI^2, qui est une puissance calorifique, se nomme **puissance active,** on la représente par la lettre P.

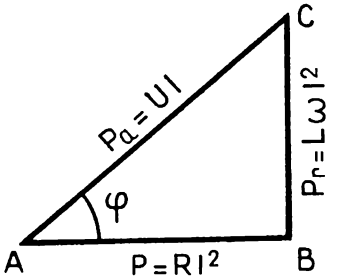


FIG. 11. — Diagramme des **puissances** correspondant au montage de la figure 9.

UI est la **puissance apparente** P_a dans la portion de circuit.

Entre ces trois puissances, le triangle rectangle ABC fournit les relations :

$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2}$$

$$P = P_a \cos \varphi = UI \cos \varphi$$

$$P_r = P_a \sin \varphi.$$

On emploie trois unités différentes pour évaluer ces puissances :

la **puissance apparente** P_a en *volts-ampères* (VA);

la **puissance réactive** P_r en vars (volts-ampères-réactifs);

la **puissance active** P en *watts* (W).

13. Valeur du facteur de puissance.

La puissance active absorbée par une portion de circuit est

$$P = kUI,$$

k étant le facteur de puissance.

Elle a aussi pour valeur

$$P = UI \cos \varphi.$$

Donc $k = \cos\varphi$. *Le facteur de puissance est égal au cosinus de l'angle* φ *de déphasage du courant sur la tension.*

D'après la formule $P = UI \cos\varphi$,

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Pour déterminer le $\cos\varphi$ d'une installation on mesure P avec un wattmètre U et I avec un voltmètre et un ampèremètre.

RÉSUMÉ

1. — Dans une *résistance pure*, une tension alternative U agit comme une tension continue sur une résistance pure :

l'intensité du courant produit est $I = U : R$;

la puissance absorbée par la résistance a pour valeur $P = UI = RI^2$; courant et tension sont en phase.

2. — L'unité d'inductance est l'*henry* : c'est le coefficient d'auto-induction d'un circuit fermé dans lequel une variation uniforme de 1 *ampère* par seconde du courant qui parcourt le circuit y produit une f. é. m. de 1 *volt*.

3. — Une tension alternative U de pulsation ω produit dans une bobine de L *henrys* de résistance négligeable un courant d'intensité $I = U : L\omega$; la puissance absorbée est nulle, le courant est déphasé d'un quart de période en arrière de la tension.

4. — Quand le circuit est composé d'une résistance R et d'une inductance L en série, une tension alternative U de pulsation ω y produit un courant d'intensité $I = U : \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$.

$z = \sqrt{R^2 + L\omega^{22}}$ est l'impédance du circuit.

Le courant est déphasé de l'angle φ en arrière de la tension. L'angle φ est défini par la relation $\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$.

La puissance absorbée est $P = UI \cos \varphi$.

EXERCICES

1. Une tension *continue* de 21 *volts* appliquée aux bornes d'une bobine y produit un courant de 6 *ampères*.

Soumise à une tension *alternative* de 114 *volts* de fréquence 50 *p/s*, la bobine est traversée par un courant de 3 *ampères*.

Calculer :

1° sa résistance,
2° son impédance,
3° son inductance.

Réponses : 3,5 Ω — 38 Ω — 0,120 *H*.

2. Une bobine a une résistance de 5 Ω et une inductance de 0,05 *henry*. On applique à ses bornes une tension alternative de 115 V, de fréquence 50 *p/s*.

Calculer :

1° la réactance de la bobine,
2° son impédance,
3° le cos φ de la bobine,
4° le courant dans la bobine,
5° la puissance apparente absorbée,
6° la puissance réelle consommée.

Réponses : 15,70 Ω — 16,5 Ω — cos φ = 0,30 — 7 A — 805 VA — 244 *W*.

3. Une bobine de résistance négligeable branchée sur une tension alternative de fréquence 50 *p/s* absorbe 4 A. Quel courant absorbe-t-elle sous une tension de même valeur mais de fréquence 25 *p/s?*

Réponse : 8 A.

4. **Un moteur à courant alternatif 110 *volts*, fréquence 50 *p/s*, absorbe en charge 5 *ampères*.** Un wattmètre indique qu'il consomme 440 *watts*.

Quel est le cos φ de ce moteur?

Réponse : 0,80.

Circuit parcouru par un courant alternatif (suite).

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un condensateur de 40 *ou* 50 microfarads *pouvant supporter* 1 000 volts.
Un voltmètre 150 volts.
Un ampèremètre 5 ampères.
Un wattmètre 5 ampères, 150 volts.
Un milliampèremètre avec zéro au milieu de l'échelle.

LEÇON

D. — Partie de circuit constituée par un condensateur.

1. Description d'un condensateur industriel.

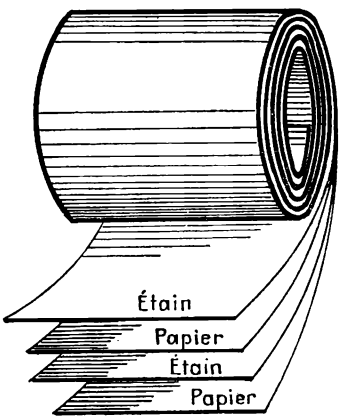


FIG. 1. — **Condensateur à feuillee d'étain** et diélectrique en papier.

Un condensateur est fait de *deux longues feuilles d'étain* ou d'aluminium séparées par deux longues bandes de papier; l'ensemble est enroulé et comprimé (fig. 1). Les bandes métalliques se nomment **armatures,** le papier qui les sépare et les isole électriquement est le **diélectrique.** Chaque armature est reliée à une borne isolée.

Les gros condensateurs sont plongés dans une cuve pleine d'huile pour améliorer l'isolement des armatures et faciliter leur refroidissement.

2. Fonctionnement avec du courant continu.

La figure 2 est le schéma du

montage des appareils. La tension continue est 110 *volts*, un galvanomètre ou un milliampèremètre, dont le zéro est au milieu de l'échelle, est placé en série avec le condensateur. Un commutateur bipolaire sert à brancher le condensateur en A sur les conducteurs amenant le courant, ou en B sur un conducteur qui réunit alors les deux armatures.

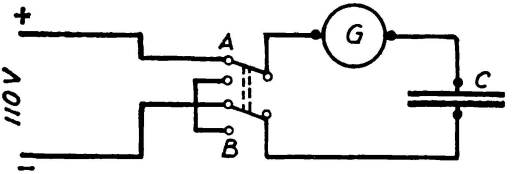


FIG. 2. — Fonctionnement d'un **condensateur sous tension continue.** Remarquez le symbole C figurant un condensateur.

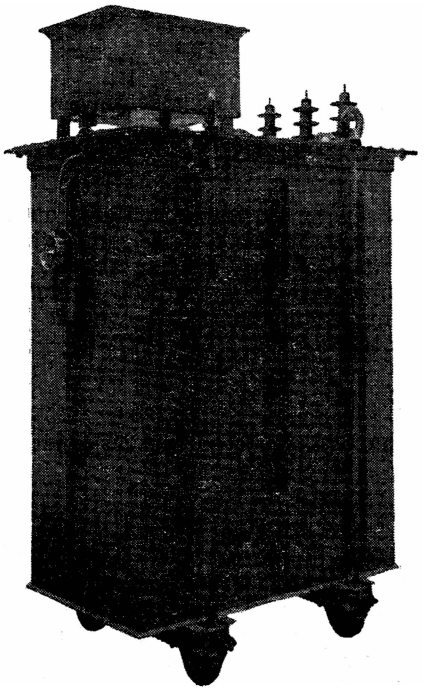


FIG. 3. — **Condensateur industriel de 5** *microfarads* logé dans l'huile d'une cuve. Il fonctionne sous 15 000 *volts*. Au-dessus, vase d'expansion de l'huile.

1° Mettons le commutateur dans la position A. Le galvanomètre dévie brusquement, puis revient au zéro. Un courant passe donc pendant un temps très court, puis cesse. La tension entre les armatures est alors 110 *volts*.

2° Faisons passer le commutateur à la position B. Le galvanomètre dévie brusquement, dans le sens contraire au précédent, puis revient au zéro. La tension entre les armatures est alors nulle.

Dans la première expérience, une certaine quantité d'électricité a été fournie par le secteur au condensateur : on dit que le condensateur s'est **chargé.**

Dans la seconde, le condensateur s'est **déchargé** à travers le conducteur qui réunit les armatures. Sa charge effectuée, et il n'y faut qu'un temps très court, le condensateur ne laisse plus passer le courant continu ; les deux armatures sont en effet isolées électriquement l'une de l'autre.

La **capacité** d'un condensateur est la quantité d'électricité qui le charge sous une tension de 1 *volt*.

L'unité de capacité est le **farad** : *c'est la capacité d'un condensateur qui se charge de* 1 coulomb *sous la tension de* 1 volt.

Un farad est très grand, aussi la capacité des condensateurs usuels s'exprime-t-elle en **microfarads** ou millionnièmes de farad (μF). Par exemple, les postes récepteurs de TSF contiennent des condensateurs de l'ordre d'un millième de microfarad; les volumineux condensateurs industriels ont une capacité de quelques microfarads ou de quelques centaines de microfarads (fig. 3).

La capacité d'un condensateur dépend seulement de la construction de l'appareil; elle est proportionnelle à la surface des armatures, inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique et dépend de la nature de ce diélectrique.

La charge Q *coulombs* d'un condensateur de capacité C *farads* sous la tension de U *volts* est $Q = C \times U$ *coulombs*.

On démontre que l'énergie emmagasinée dans le condensateur est

$$W = \frac{1}{2} Q \times U = \frac{1}{2} C U^2 \text{ } \textit{joules}.$$

Remarque. — Le diélectrique qui sépare les deux armatures d'un condensateur n'est pas un isolant parfait, il laisse passer un faible courant que l'on nomme *courant de fuite*. Quand le condensateur reste longtemps branché sur la ligne d'alimentation, le courant de fuite l'échauffe. Quand on coupe le courant d'alimentation, le courant de fuite décharge assez vite le condensateur.

3. Condensateurs électrolytiques.

Ces condensateurs sont de plus en plus employés, surtout les condensateurs *secs* que nous allons décrire.

Condensateurs électrolytiques polarisés pour c. c.

L'**anode** est une bande d'aluminium. Elle est d'abord *formée*, c'est-à-dire recouverte sur une face d'une couche adhérente d'alumine. Pour la former, on la dispose comme anode dans un bac à électrolyse contenant, par exemple, une solution de borate d'ammonium et d'acide borique. On fait croître lentement la tension entre les bornes du bac, jusqu'à dépasser de 15 à 20 % la tension d'utilisation prévue pour le condensateur que l'on fabrique. Le courant dans le bac diminue peu à peu, la formation est terminée quand ce courant n'est plus que de l'ordre de grandeur du courant de fuite.

L'électrolyse dégage sur l'anode de l'oxygène qui forme, sur l'alumi-

nium, une couche mince et adhérente d'alumine. C'est cette couche qui sera le diélectrique du condensateur.

La **cathode** est une feuille poreuse de gaze, de papier buvard, de cellulose, que l'on imprègne à chaud d'un mélange fondu de sels tels que : acétate d'ammonium, acétate d'aluminium et phosphate trisodique ; ce mélange, en refroidissant, se prend en une masque visqueuse presque solide. Une bande d'étain ou d'aluminium appliquée sur la cathode y conduit le courant.

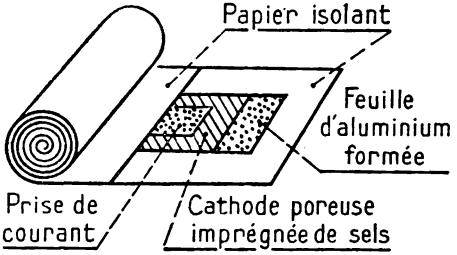


FIG. 4. — **Condensateur électrolytique** polarisé pour courant continu.

L'anode et la cathode sont prises entre deux feuilles de papier isolant, l'ensemble est enroulé en un cylindre que l'on munit de fils de connexions et qu'on loge dans une boîte de carton ou d'aluminium (fig. 4).

A cause de la très faible épaisseur de la pellicule d'alumine formant le diélectrique, la capacité d'un condensateur électrolytique est, à volume égal, bien plus grande que celle d'un condensateur au papier. Par exemple, un condensateur d'une vingtaine de microfarads, pour 600 à 800 *volts*, est un cylindre d'une dizaine de centimètres de longueur et d'environ trois centimètres de diamètre.

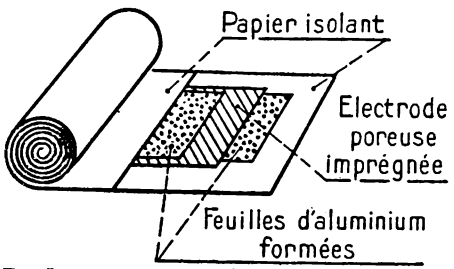


FIG. 5. — **Condensateur électrolytique** non polarisé pour courant alternatif.

La tension d'emploi est indiquée sur l'appareil et ne doit pas être dépassée.

De tels condensateurs sont *polarisés*. Si l'on inverse la tension dont le sens normal est indiqué par les signes + et — aux bornes de l'appareil, le condensateur est détruit au bout de quelques secondes.

Condensateurs électrolytiques non polarisés pour c. a.

Ils se composent de deux électrodes d'aluminium *formées* comme les anodes des condensateurs à c. c., opposées par leurs couches diélectriques et séparées par une électrode constituée comme la cathode d'un conden-

sateur à c. c. Le courant alternatif est amené aux électrodes d'aluminium (fig. 5).

Vous voyez qu'un condensateur pour c. a. se compose de deux condensateurs à c. c. appliqués l'un contre l'autre par leurs cathodes, en réalité confondues en une seule.

A volume égal, la capacité d'un condensateur à c. a. est la moitié de celle d'un condensateur à c. c.

4. Une tension alternative U de pulsation ω est appliquée aux bornes d'un condensateur de C farads. On démontre que :

1° La tension, le courant, la capacité sont liés par la relation :

$$I = U \times C \times \omega.$$

ampères volts farads radians/s

Cette formule s'écrit aussi :

$$I = U : \frac{1}{C\omega}.$$

Sous cette forme, elle montre que la grandeur $\frac{1}{C\omega}$ joue dans le circuit le même rôle qu'une résistance; on lui donne le nom de **réactance de capacité** et on l'exprime en ohms.

Remarquez que l'intensité du courant dans un condensateur est proportionnelle à la fréquence de la tension.

2° La **puissance** dépensée dans le condensateur est nulle.

3° Le courant est **déphasé en avant** de la tension d'un quart de période.

Courant et tension sont en quadrature, comme dans le cas d'une inductance, mais *le sens du déphasage est inversé.*

5. Vérifions ces résultats.

Nous disposons d'un condensateur de 50 *microfarads.*

a) ***Courant.*** — Nous appliquons la tension de 115 *volts*, 50 *périodes par seconde*, aux bornes du condensateur; un ampèremètre et un voltmètre sont mis dans le circuit (fig. 6).

Le courant absorbé est 1,80 *ampère.*

Or $1{,}80 = 115 \times 50 \times 314 \times 10^{-6}$. La relation $I = UC\omega$ est vérifiée.

Vous voyez qu'il est possible de mesurer la capacité d'un condensa-

teur avec un ampèremètre et un voltmètre, quand la fréquence de la tension d'alimentation est connue. Toutefois ce procédé n'est applicable que si la capacité à mesurer n'est pas trop petite.

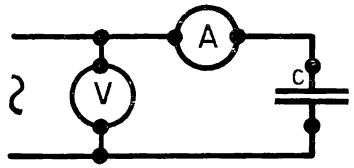


FIG. 6. — Condensateur alimenté par une tension alternative.

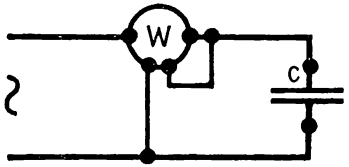


FIG. 7. — La **puissance** absorbée par le condensateur est **nulle.**

b) ***Puissance absorbée.*** — Un wattmètre monté dans le circuit du condensateur indique que la puissance absorbée est nulle (fig. 7).

Nous avons vu dans la leçon précédente qu'il en est ainsi quand l'intensité et la tension sont en quadrature.

c) ***Déphasage entre le courant et la tension.*** — Avec un oscillographe, on observe simultanément les courbes du courant et de la tension. On constate que la courbe du courant est déphasé d'un quart de période *en avant* par rapport à celle de la tension (fig. 8).

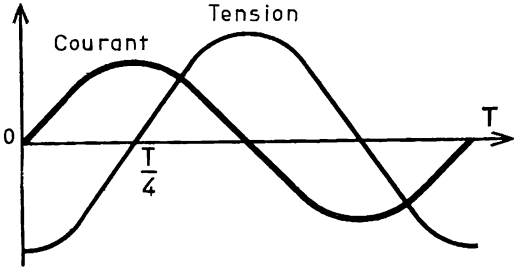


FIG. 8. — Le courant dans un condensateur est déphasé de 1/4 de période **en avant de la tension.**

On explique facilement ce déphasage. Au cours d'une période, tant que la tension croît dans un certain sens, le condensateur se charge par un courant d'un sens déterminé dans le circuit. Quand la tension aux bornes du condensateur atteint sa valeur maximum, elle est la même que celle du secteur : le condensateur est chargé, le courant s'annule.

Puis la tension du secteur baisse, le condensateur se décharge en produisant un courant de sens contraire au précédent. Le courant change donc de sens un quart de période avant la tension.

E. — Circuits complexes.

7. Cas d'un circuit formé d'une résistance R, d'une inductance L et d'un condensateur C en série.

Le circuit de la figure 9 se compose d'une résistance AB de 4 *ohms*, d'une bobine BC de 0,26 *henry*, d'un condensateur CD de 50 *microfarads* en série, avec un rhéostat de réglage et un ampèremètre.

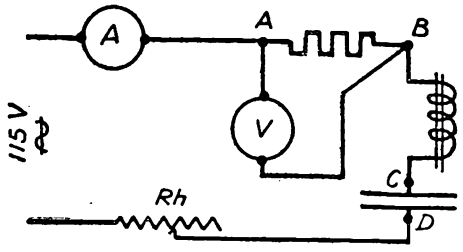


FIG. 9. — Circuit composé d'une résistance pure, d'une bobine et d'un condensateur montés en série.

Appliquons au circuit la tension alternative à 50 *périodes par seconde* du secteur et réglons le courant à 3 *ampères*.

Avec un voltmètre, nous mesurons les tensions :

entre les extrémités A et D de la série des trois appareils : 55 *volts;*
entre les extrémités A et B de la résistance : 12 *volts;*
entre les bornes B et C de la bobine : 245 *volts;*
entre les bornes C et D du condensateur : 191 *volts.*

Vous remarquez :

1° que la tension totale entre les points A et D est très inférieure à la somme des tensions partielles; vous savez que ce fait indique que les tensions partielles sont déphasées les unes par rapport aux autres.

2° que les tensions entre les bornes de la bobine et entre les bornes du condensateur sont élevées et dépassent la tension d'alimentation.

Le diagramme vectoriel des tensions dans le circuit va vous expliquer ces phénomènes.

8. Construisons et étudions le diagramme vectoriel des tensions du circuit.

a) Soit Ax la direction représentant la phase du courant (fig. 10).

La tension RI entre les extrémités de la résistance est en phase avec le courant; nous la représentons à une certaine échelle par le vecteur $\overrightarrow{AB}$ que nous traçons sur Ax.

La tension $L\omega I$ entre les bornes de la bobine est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en *avant* du courant, elle est représentée par le vecteur $\overrightarrow{BC}$.

La tension $\frac{I}{C\omega}$ est déphasée de $\frac{\pi}{2}$ en arrière du courant, le vecteur $\overrightarrow{CD}$ la représente.

La résultante $\overrightarrow{AD}$ des trois vecteurs figure la tension U entre les points extrêmes A et D du circuit.

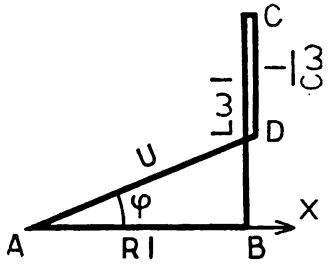


FIG. 10. — **Diagramme vectoriel des tensions** dans le circuit de la figure 9 (la figure n'est pas dessinée à l'échelle pour qu'elle soit plus claire).

b) Dans le triangle rectangle ABD, $\overline{AD}^2 = \overline{AB}^2 + \overline{BD}^2$. Or BD a pour longueur BC — CD. Donc :

$$U^2 = R^2 I^2 + \left(L\omega I - \frac{I}{C\omega}\right)^2,$$

$$U^2 = I^2 \left[R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2\right],$$

et

$$\boldsymbol{U = I\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}.$$

Cette formule ressemble à celle de la loi d'Ohm $U = RI$; l'expression $\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ définit une grandeur analogue à une résistance. On la nomme **impédance** de la portion de circuit, on la désigne par la lettre Z et on l'exprime en *ohms*.

Ainsi les formules

$$U = Z \times I$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

traduisent la relation existant entre la tension, le courant, la résistance, l'inductance et la capacité dans une portion de circuit parcourue par un courant alternatif.

c) Le courant est déphasé par rapport à la tension d'un angle φ défini par l'expression :

$$tg\,\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}.$$

Le diagramme montre que les tensions $L\omega I$ et $\frac{I}{C\omega}$ peuvent être supérieures à U si les valeurs de $L\omega$ et $\frac{I}{C\omega}$ sont suffisamment grandes.

9. Diagramme vectoriel des puissances.

Multiplions par I les vecteurs de la figure 11, ce qui revient à changer l'échelle du diagramme.

Le vecteur $\overrightarrow{AB}$ représente RI^2. C'est la seule puissance effective dans le circuit. Elle se manifeste sous forme de chaleur et s'évalue en *watts*. On la nomme **puissance réelle** ou **active.**

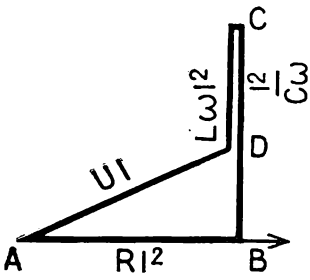


FIG. 11. — **Diagramme vectoriel des puissances** en jeu dans le montage de la figure 9.

Le vecteur $\overrightarrow{BC}$ a pour longueur $L\omega I^2$. Cette expression a la même forme que RI^2, la réactance de self $L\omega$ remplaçant la résistance R. Elle représente une sorte de **puissance** dite **réactive.** En réalité, il s'agit d'une puissance fictive, car elle ne peut fournir ni énergie calorifique ni énergie mécanique. Parce qu'elle est due à l'existence d'un flux alternatif dans la bobine, on la nomme parfois **puissance magnétisante.**

La longueur du vecteur $\overrightarrow{CD}$ est $\frac{1}{C\omega} \times I^2$. L'expression $\frac{1}{C\omega}$, qui est la réactance de capacité, est aussi analogue à R. On donne aussi à $\frac{1}{C\omega} \times I^2$ le nom de **puissance réactive.** Il s'agit encore d'une puissance fictive non mesurable avec un wattmètre ordinaire. Remarquez que, dans le diagramme, elle est de sens contraire à celui de la puissance magnétisante. *C'est pourquoi on convient de la considérer comme négative.*

Le vecteur résultant $\overrightarrow{AD}$ a pour longueur UI. Il représente la **puissance apparente** fournie au circuit. Cette puissance n'est qu'apparente, puisque le circuit n'absorbe qu'une puissance réelle RI^2 figurée par le vecteur $\overrightarrow{AB}$.

Le triangle rectangle ABD fournit la relation suivante entre ces diverses puissances :

$$UI = \sqrt{(RI^2)^2 + \left(L\omega I^2 - \frac{I^2}{C\omega}\right)^2}$$

Nous reviendrons sur ce sujet dans la leçon suivante.

10. Circuit en résonance.

Examinons la formule

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

qui définit l'*impédance* d'un circuit fait d'une résistance, d'une bobine et d'un condensateur en série.

Il peut arriver que la réactance de la bobine $L\omega$ et la réactance du condensateur $\frac{1}{C\omega}$ soient égales. Alors elles se compensent et l'impédance du circuit se réduit à la résistance R. *Le courant a pour valeur* $I = U : R$. De plus, $\text{tg}\,\varphi = \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) : R = 0$, $\varphi = 0$, *le courant et la tension sont en phase.*

On dit que *le circuit est* **en résonance.**

La condition de résonance est donc :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}.$$

ou

$$LC\omega^2 = 1.$$

On la réalise en modifiant soit l'inductance, soit la capacité, soit la fréquence dont dépend ω.

C'est quand le circuit est en résonance que, pour une tension d'alimentation déterminée, le courant est maximum et les surtensions sont les plus élevées.

Par exemple, si dans le montage de la figure 9 le condensateur est réglable et si nous l'ajustons pour obtenir la résonance, avec seulement 55 volts aux bornes du circuit, le courant atteint $U : R = 55 : 4 \simeq 14$ *ampères* et les tensions partielles sont $RI = 55$ *volts* aux bornes de la résistance, $L\omega I = 82 \times 14 = 1\,148$ *volts* aux bornes de la bobine et aux bornes du condensateur.

Dans les installations industrielles, la résonance produit des surtensions dangereuses pour les appareils et le personnel : il faut l'éviter.

Au contraire, dans les appareils récepteurs de TSF, qui captent dans l'espace des tensions infimes, on met les circuits en résonance pour obtenir des tensions appréciables aux bornes du condensateur.

11. Cas d'un circuit formé d'une bobine et d'un condensateur en parallèle.

Montons en parallèle sous 115 volts alternatifs la bobine et le condensateur employés précédemment avec un ampèremètre dans le circuit principal (fig. 12).

Sous 115 *volts*, la bobine absorbe 1,4 *ampères*, le condensateur 1,8 *ampères*. Le courant total est à peu près 0,4 *ampère*.

Donc : quand plusieurs appareils sont montés en parallèle dans un circuit alternatif, en général *le courant total n'est pas la somme arithmétique des courants dérivés qui sont le plus souvent déphasés les uns par rapport aux autres.*

12. Construisons le diagramme vectoriel des intensités.

Prenons comme origine des phases la phase de la tension Ax (fig. 13).

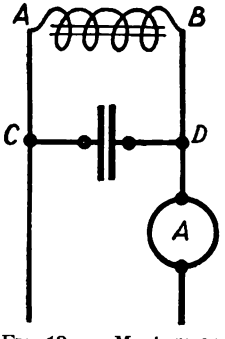


FIG. 12. — Montage en parallèle d'une bobine self et d'un condensateur.

Le courant dans la bobine a pour valeur $I_1 = U : L\omega$, il est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ *en arrière* de la tension. Nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{AB}$.

Le courant dans le condensateur, $I_2 = UC\omega$, est déphasé *en avant* de la tension de $\frac{\pi}{2}$; nous la représentons par le vecteur $\overrightarrow{AC}$.

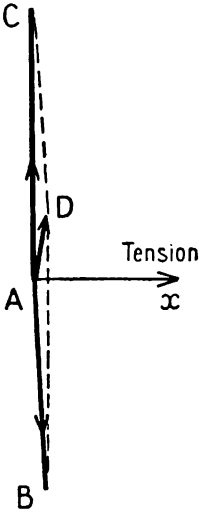


FIG. 13. — **Diagramme vectoriel des intensités** dans le montage de la figure 12. La résultante AD est peu importante.

Les deux vecteurs $\overrightarrow{AB}$ et $\overrightarrow{AC}$ sont dans la même direction et opposés l'un à l'autre. Leur somme géométrique $\overrightarrow{AD}$ a pour longueur leur différence.

Si $L\omega = \frac{1}{C\omega}$, en d'autres termes quand la condition de résonance est réalisée, $I_1 = I_2$, la somme est nulle. L'ensemble de la bobine et du condensateur annule le courant dans le circuit principal : on dit qu'il forme un **circuit bouchon.**

L'effet bouchon ne se produit que pour une valeur déterminée de la pulsation, donc de la fréquence, quand L et C sont fixes. Dans une ligne où des *courants alternatifs de fréquences différentes* sont superposés, on peut supprimer certains de ces courants par des bouchons appropriés.

En pratique, l'effet bouchon n'est jamais total. Une bobine possède toujours quelque résistance ohmique. Le courant qui la parcourt n'est

pas déphasé exactement de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de la tension, mais d'un angle un peu inférieur. Il n'est pas tout à fait en opposition de phase avec le courant de même intensité dans le condensateur, et la somme des deux conserve une faible valeur.

13. Conclusion.

Les 34e et 35e leçons nous ont montré que l'étude des circuits à courants alternatifs est compliquée. Dans ces circuits, la résistance, l'inductance, la capacité, la fréquence, les déphasages, le facteur de puissance, jouent un grand rôle.

RÉSUMÉ

1. — Un condensateur se compose de deux *armatures* conductrices séparées par un diélectrique isolant.

L'unité de capacité des condensateurs est le *farad*. C'est la capacité d'un condensateur qui se charge de 1 *coulomb* quand on applique une tension de 1 *volt* entre ses bornes.

2. — Quand une tension U, de pulsation ω, est appliquée aux bornes d'un condensateur de capacité C, l'intensité du courant est $I = UC\omega$. Ce courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en avant de la tension. La puissance absorbée par le condensateur est nulle.

3. — Quand une résistance R, une inductance L et un condensateur de capacité C sont en série sous une tension U de pulsation ω, le courant dans le circuit est :

$$I = U : \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$ **est *l'impédance* du circuit.**

Le courant est déphasé sur la tension d'un angle φ déterminé par l'expression

$$tg\varphi = \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) : R.$$

4. Si $L\omega = \frac{I}{C\omega}$, le circuit est en *résonance*.

En montant en parallèle une bobine d'inductance L et un condensateur de capacité C, le courant principal est presque nul quand la condition de résonance est satisfaite. L'ensemble bobine et condensateur constitue un *circuit bouchon*.

EXERCICES

1. Un condensateur de 20 *microfarads* et une bobine d'inductance 0,5 *henry*, dont la résistance est 10 *ohms*, sont mis en série et alimentés par une tension de 110 *volts* et 50 *périodes par seconde*.

Chercher :

a) l'impédance du circuit,

b) l'intensité du courant,

c) la tension aux bornes de la bobine,

d) la tension aux bornes du condensateur.

Réponses : 10,2 Ω — 10,8 *A* — 1 750 *V* — 1 717 *V*.

2. Un circuit composé d'un condensateur de capacité C = 1/1 000 *microfarad* et d'une inductance L de valeur inconnue est en résonance pour une réception de T. S. F. dont la fréquence est 695 *kilocycles par seconde*. Calculer la valeur de l'inductance.

Réponse : environ 2 *millihenrys*.

3. Pour déterminer la capacité d'un condensateur, on branche l'appareil sur le réseau de distribution qui fournit du courant alternatif à 50 *p/s* en mettant dans le circuit un voltmètre et un ampèremètre sensible.

Le condensateur absorbe 0,72 *ampère* sous 115 *volts*.

Calculer sa capacité.

Réponse : 20 *microfarads*.

4. Une installation d'éclairage à courant alternatif, tension 115 *volts*, fréquence 50 *hertz*, comprend :

8 tubes fluorescents de 68 *watts*, 5 de 46 *watts*;

10 lampes à incandescence de 60 *watts*, 10 de 40 *watts*, 3 de 100 *watts*.

Les puissances indiquées sont des puissances actives. Le courant alimentant les tubes fluorescents est déphasé de 66° en arrière de la tension. Celui des lampes à incandescence est en phase avec la tension.

1° Calculer la puissance active absorbée par les tubes fluorescents.

2° Déterminer au moyen d'une épure la puissance apparente prise au réseau par ces tubes, et l'intensité absorbée.

3° Calculer la puissance absorbée par les lampes à incandescence et l'intensité qu'elles prennent au réseau.

4. Déterminer par une épure le courant total fourni par le réseau à l'installation.

Réponses : 744 W; — 1 780 VA; 15,4 A; — 1 300 W; 11,3 A; — 22,6 A.

Importance du facteur de puissance, d'une installation.

1. Puissances apparente, active et réactive d'une installation.

a) Une installation à courant alternatif qui absorbe I *ampères* sous U *volts* consomme une **puissance apparente**

$$P_a = U \times I \text{ volts-ampères.} \qquad (1)$$

On mesure cette puissance apparente avec un ampèremètre et un voltmètre; on l'évalue en volts-ampères.

b) Quand le facteur de puissance de l'installation est $k = \cos \varphi$, la **puissance réelle ou active** absorbée est :

$$P = U \times I \times \cos \varphi \text{ watts} \qquad (2)$$

Cette puissance active est mesurée avec un wattmètre et évaluée en watts.

En même temps, l'installation consomme une **puissance magnétisante ou réactive.**

$$P_r = U \times 1 \times \sin \varphi \text{ vars} \qquad (3)$$

La puissance réactive est calculée en se servant de la puissance apparente et de la puissance active, ou bien est mesurée avec un wattmètre pour puissance réactive. On l'exprime en vars.

c) Les formules (2) et (3) s'écrivent aussi

$$P = P_a \cos \varphi$$
$$P_r = P_a \sin \varphi. \qquad (4)$$

Puisque $\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$:

$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2}.$$

P_a peut donc être représentée par l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont P et P_r sont les côtés de l'angle droit (fig. 1).

d) De l'une des formules (4) on tire

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_a}.$$

L'angle de déphasage φ est l'angle aigu BAC du triangle rectangle de la figure 1.

e) Énonçons sans le démontrer le **théorème de Boucherot** qui concerne les puissances active et réactive :

Dans son ensemble, un réseau à courant alternatif distribue simultanément de la puissance active P et de la puissance réactive P_r. La puissance active totale du réseau est la somme des puissances actives des récepteurs ; la puissance réactive totale du réseau est la somme des puissances réactives qu'absorbent tous les récepteurs.

En d'autres termes, aucun watt *ne devient* var *et inversement.*

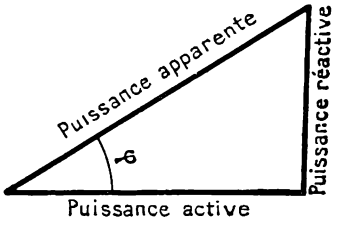


FIG. 1. — **Triangle des puissances.** La puissance apparente d'un récepteur de courant alternatif (ou de toute une installation) est représentée par l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont les côtés de l'angle droit sont la puissance active et la puissance réactive.

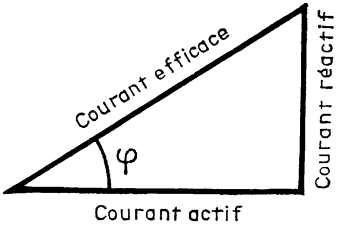


FIG. 2. — **Triangles des courants.** Il est *semblable*, au sens géométrique du terme, au triangle des puissances.

2. Courant actif et courant réactif.

Divisons par U les deux membres des expressions (1), (2) et (3)

$$P_a : U = I,$$
$$P : U = I \cos\varphi,$$
$$P_r : U = I \sin\varphi.$$

I est le **courant efficace** absorbé par l'installation; on donne à $I \cos\varphi$ le nom de **courant actif ou watté**[1] et à $I \sin\varphi$ le nom de **courant réactif** ou **dewatté**[1] ou **magnétisant.**

Ces trois courants sont proportionnels à P_a, P et P_r, ils sont donc les trois côtés d'un triangle rectangle (fig. 2), identique, à l'échelle près, au triangle des puissances (fig. 1).

---

1. Les mots *watté* et *dewatté* sont très employés mais n'appartiennent pas au Vocabulaire électrotechnique de l'U.T.E.

3. Quelle est celle des trois puissances qui intéresse surtout le consommateur d'énergie électrique?

Le consommateur utilise des lampes et des moteurs. Il achète de l'énergie électrique pour la transformer en énergie calorifique et en énergie mécanique. Or, c'est l'énergie électrique active qu'il est seulement possible de transformer. L'abonné demande donc au secteur de lui fournir de l'énergie active, des kilowatts-heures.

Pourtant certains récepteurs, tels que les moteurs, possèdent des parties magnétiques soumises à une aimantation alternative. En plus de l'énergie active qu'ils transforment, il faut leur fournir de l'énergie magnétisante ou réactive. Ils absorbent une puissance apparente supérieure à la puissance active qu'ils transforment, en d'autres termes leur facteur de puissance est inférieur à l'unité.

Pour une puissance réelle déterminée, *le courant dans une installation est inversement proportionnel au cos* φ. Il en résulte que si le cos φ est faible, les pertes en chaleur Joule sont plus grandes dans les conducteurs de l'installation la chute de tension est plus importante. L'abonné est parfois obligé d'employer des appareils de manœuvre et de sécurité de dimensions plus grandes, donc plus coûteux. S'il se sert de transformateurs il les lui faudra de puissance apparente plus grande donc plus volumineux plus lourds et plus chers.

Mais c'est surtout le fournisseur de courant qui subit des pertes importantes quand le cos φ d'une installation qu'il alimente est « mauvais », c'est-à-dire faible.

5. Conséquences d'un mauvais facteur de puissance pour le fournisseur de courant.

Supposons que l'abonné consomme 100 *kilowatts* qui lui sont fournis sous 1 000 *volts*. Il paie le nombre de kilowatts-heures correspondants.

Si le facteur de puissance de l'installation était maximum, c'est-à-dire égal à l'unité, le secteur fournirait seulement 100 *ampères*.

Si le cos φ n'atteint que 0,50, la formule

$$P = UI \cos \varphi$$

montre que l'installation absorbe 200 *ampères* pour la même puissance de 100 *kilowatts*.

Il en résulte :

1° Que les pertes ohmiques dans la ligne de transport sont quatre fois plus grandes : pour une ligne de 0,5 *ohm* elles atteignent

$$0{,}5 \times 200^2 = 20\,000 \text{ } watts$$

au lieu de $0{,}5 \times 100^2 = 5\,000$ *watts* pour $\cos \varphi = 1$.

2° La chute de tension en ligne est 100 *volts* au lieu de 50 *volts* : le générateur devra produire 1 100 *volts* au départ au lieu de 1 050 volts.

3° Les enroulements du générateur sont parcourus par un courant de 200 *ampères* au lieu de 100, il les faudra beaucoup plus gros.

Vous voyez que *le fournisseur de courant a intérêt à ce que le cos* φ *de l'installation de son abonné soit élevé.*

6. Comment pousser les abonnés à améliorer le facteur de puissance de leurs installations?

1° Le secteur est autorisé à refuser la fourniture de courant si le cos φ est trop faible.

2° Le prix du kilowatt-heure est fixé pour un facteur de puissance de 0,86. Une bonification est accordée à l'abonné si le cos φ dépasse 0,86; une pénalité sous forme d'un supplément à payer lui est appliquée si le cos φ est inférieur à 0,86.

3° Dans les installations importantes et moyennes, le secteur fait installer deux compteurs, l'un d'énergie active, l'autre d'énergie réactive et les deux sortes d'énergie sont facturées.

7. Amélioration du facteur de puissance d'une installation.

Vous avez vu dans la leçon précédente qu'un condensateur placé dans un circuit y produit de l'énergie réactive dite négative parce qu'elle compense plus ou moins l'énergie réactive due à la self-induction des récepteurs en fonctionnement dans le circuit.

Il est donc possible, avec un ou plusieurs condensateurs de capacité convenable, d'amener le facteur de puissance à une valeur déterminée.

Un condensateur ne consomme pratiquement pas d'énergie active, l'amélioration du facteur de puissance s'effectue donc sans dépenses autres que celles d'acquisition et de mise en place du matériel nécessaire.

On se sert aussi de moteurs synchrones fortement excités ou de moteurs asynchrones synchronisés. Nous étudierons seulement l'emploi de condensateurs.

8. Détermination de la capacité des condensateurs nécessaires pour augmenter le cos φ d'une installation.

Soit à relever de 0,68 à 0,82 le cos φ d'une installation de 50 *kilowatts* sous 200 volts.

a) ***Puissance réactive à produire.*** — On peut déterminer graphiquement cette puissance ou la calculer.

1° *Construction graphique.* — La puissance apparente correspondant à 50 *kilowatts* est :

quand cos φ = 0,68, 50 : 0,68 = 73,5 *kVA ;*
quand cos φ = 0,82 50 : 0,82 = 61 *kVA.*

Traçons une droite AB représentant à une échelle choisie 50 *kW* (fig. 3). Construisons le triangle rectangle ABC dans lequel AC représente 73,5 *kVA ;* BC mesure la puissance réactive de l'installation quand cos φ = 0,68, soit, compte tenu de l'échelle de la figure, 54 *k var.*

Construisons le triangle rectangle ABC′ dans lequel AC′ représente 61 *kVA.* A l'échelle de la figure BC = 35 *k var,* c'est la puissance réactive quand cos φ = 0,82.

La puissance réactive négative à fournir pour amener le facteur de puissance de 0,68 à 0,82 est donc C′C soit 19 *k var.*

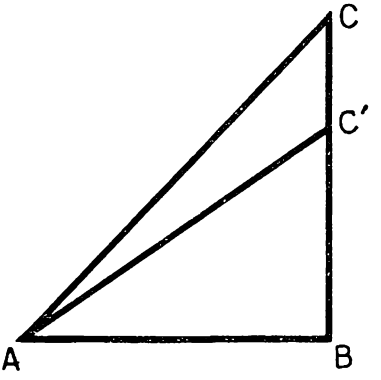


FIG. 3. — **Détermination graphique** de la puissance réactive nécessaire pour relever le facteur de puissance d'une installation.

2° *Calcul.* — Les formules (4) sont les plus commodes à employer.

Quand cos φ = 0,68, sin φ = 0,73 et

$$P_r = \frac{P \times \sin\varphi}{\cos\varphi} = \frac{50 \times 0{,}73}{0{,}68} = 54 \text{ } k \text{ } var.$$

Quand cos φ = 0,82, sin φ = 0,57 et

$$P_r = \frac{50 \times 0{,}57}{0{,}82} = 35 \text{ } k \text{ } var.$$

La puissance réactive négative à fournir est 19 *k var,* valeur déjà obtenue graphiquement.

b) ***Capacité des condensateurs nécessaires.*** — La puissance réactive d'un condensateur de C *farads,* absorbant I *ampères* avec U *volts* à ses bornes est

$$P_r = UI \text{ } var.$$

Or $I = UC\omega$, donc $P_r = U^2C\omega$ et $C = P_r : U^2\omega$.

La pulsation du courant ω a pour valeur $2\pi f$, soit 314 quand la fréquence du secteur est 50 *p/s*. Donc

$$C = [19\,000 : (200^2 \times 314)] \times 10^6 = 1\,510 \text{ } \textit{microfarads}.$$

c) ***Montage des condensateurs dans l'installation.*** — On peut se servir d'un seul condensateur monté en dérivation sur la ligne qui alimente toute l'installation. On réalise ainsi une *compensation centralisée*.

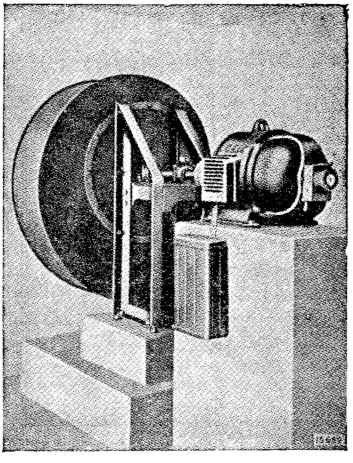


FIG. 4. — **Condensateur** de 3 k*VAr* relevant le cos φ d'un moteur de 20 *ch*, 500 *V*, 50 *p/s*. Ce moteur commande le ventilateur que l'on voit à gauche. Le condensateur est la boîte fixée contre le socle du moteur.

Puisque la puissance d'un condensateur est proportionnelle au carré de la tension à ses bornes, il est possible, dans le cas d'une compensation centralisée, de réduire beaucoup la capacité employée en branchant le condensateur sur le secondaire d'un transformateur élévateur de tension. Dans l'exemple étudié, avec un transformateur de 200/1 000 *volts*, un condensateur de

$$1\,510 \times \frac{200^2}{1\,000^2} = 60 \text{ } \textit{microfarads}$$

suffira.

Une *compensation répartie* s'obtient en employant plusieurs condensateurs dont la capacité totale est de 1 510 *microfarads* que l'on place chacun aux bornes d'un récepteur dont le cos φ est faible (fig. 4). Quand le récepteur ne fonctionne pas, il en est de même du condensateur qui l'accompagne. Cette disposition présente l'avantage de proportionner, du moins grossièrement, la puissance réactive à la puissance réelle consommée.

RÉSUMÉ

1. — La puissance *réactive* ou *magnétisante* d'une installation ne se transforme pas en *puissance active*.

Elle augmente les pertes en chaleur Joule dans les lignes de transport d'énergie et, de plus, oblige à réduire la puissance réelle maximum des générateurs.

2. — On améliore le facteur de puissance d'une installation en plaçant en dérivation sur les lignes d'alimentation un ou plusieurs condensateurs.

EXERCICES

1. Un moteur à courant alternatif absorbe 25 *ampères* sous 200 *volts*. Un wattmètre indique que la puissance fournie alors au moteur est 4 000 *watts*.

1° Calculer la puissance apparente.

2° Quel est le cos φ du moteur?

3° Quelle puissance réactive utilise-t-il?

Réponses : 5 000 *VA* — 0,8 — 3 750 ***vars***.

2. Un condensateur, dont la tension aux bornes est 500 *V*, a une puissance de 3 *kVAr* à la fréquence de 50 *p/s*.

1° Quelle est l'intensité du courant d'alimentation du condensateur?

2° Quelle **est sa** capacité évaluée en microfarads?

Réponses : 6 A — 38,2 *microfarads*.

3. Un moteur à courant alternatif absorbe à pleine charge 37 *kW* sous 550 *V*. Son facteur de puissance est alors 0,80. Quelle puissance réactive absorbe-t-il?

Il est souvent utilisé à charge réduite. Quand il absorbe seulement 10 *kW*, son cos φ est seulement 0,37. Quelle est alors sa puissance réactive?

Quelle puissance réactive négative faut-il lui fournir pour élever dans ce cas son cos φ à 0,80?

Quelle est la capacité du condensateur employé sous 1 000 V à mettre en dérivation à ses bornes pour obtenir ce résultat?

Quel est le cos φ du moteur fonctionnant à pleine charge avec le condensateur à ses bornes?

Réponses : 27,75 *kvar* — 25 ***kvar*** — 17,5 ***kvar*** — 56 *microfarads* — 0,96.

4. Un tube fluorescent de 40 *watts*, 115 *volts*, 50 *hertz*, a un cos φ de 0,4.

1° Calculer la puissance apparente et l'intensité prises au réseau par le tube.

2° Déterminer la puissance réactive absorbée.

Pour augmenter le facteur de puissance du tube jusqu'à 0,8, on monte un condensateur en parallèle avec le tube.

3° Calculer la puissance apparente et l'intensité prises au réseau par l'ensemble tube-condensateur.

4° Déterminer la nouvelle valeur de la puissance réactive absorbée.

5° Quelle est la puissance réactive négative fournie par le condensateur?

6° Calculer la capacité du condensateur employé.

Réponses : 100 *VA ;* 0,87 *A ;* — 91 ***vars*** *;* — 50 *VA ;* — 0,43 *A ;* — 30 *vars ;* — 61 ***vars*** *;* — 15 *microfarads*.

9. ALTERNATEURS ET TRANSFORMATEURS

37e LEÇON

Alternateurs.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Quelques tôles de stator d'alternateur.
Quelques tôles de pôle inducteur de la même machine.

LEÇON

On nomme **alternateurs** les générateurs de courants alternatifs. La plupart sont des machines très puissantes en service dans les centrales thermiques et hydrauliques.

On a construit, depuis une soixantaine d'années, des alternateurs de types très différents qui n'ont plus qu'un intérêt historique. Actuellement, deux formes sont adoptées : les **alternateurs à pôles inducteurs saillants,** dont la vitesse est relativement lente, sont entraînés par des machines à vapeur, des moteurs à gaz ou Diesel, des turbines hydrauliques; les **turbo-alternateurs,** à inducteurs lisses, sont accouplés à des turbines à vapeur tournant à très grande vitesse.

A. — Alternateurs à pôles inducteurs saillants.

1. Description.

Un alternateur se compose d'un **inducteur** mobile ou **rotor** et d'un **induit** fixe ou **stator.** Différence avec les dynamos à courant continu où l'*inducteur est fixe* et l'*induit mobile.*

Inducteur. — Il est formé de *noyaux polaires* fixés sur la jante d'un volant en acier coulé (fig. 1). Ces noyaux sont terminés par des *pièces polaires.* Ils sont entourés de bobines connectées en série (non représentées sur la figure 2) recevant du courant continu amené par deux frotteurs et deux bagues isolées calées sur l'arbre du rotor.

Les pôles sont alternativement nord et sud; leur nombre $2p$ est toujours pair. Certains rotors n'ont que 4 pôles, il en est qui en possèdent 60 et même 80.

Induit. — L'inducteur tourne à l'intérieur d'un anneau fixe qui porte *l'enroulement induit.* Cet enroulement est logé dans des encoches percées sur la face interne de l'anneau.

Pour réduire les courants de Foucault, le stator, les pièces polaires des noyaux et souvent les noyaux tout entiers du rotor sont feuilletés.

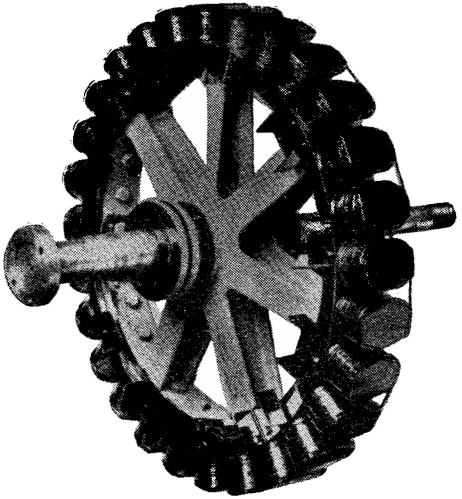


FIG. 1. — **Rotor d'alternateur à pôles saillants.** Comptez le nombre des pôles. Observez les bagues d alimentation.

2. Enroulement du stator.

La figure 2 représente schématiquement l'*enroulement du stator* d'un alternateur ayant 6 pôles et 12 encoches.

Dans chaque encoche passent plusieurs conducteurs formant un côté d'une bobine. Par exemple une bobine est logée dans les encoches 1-4, une autre, du même nombre de spires dans les encoches 2-3, etc.

Les bobines sont couplées **en série.**

La figure 3 est le développement du stator avec son enroulement.

Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine.

Elles ne sont pas connectées ensemble : **l'enroulement est ouvert.** Nouvelle différence avec les dynamos à courant continu dont l'induit est fermé sur lui-même.

3. Fonctionnement d'un alternateur.

Un courant continu passe dans les bobines du rotor et aimante les pôles (fig. 4). Un flux magnétique sort de chaque pôle nord, traverse l'entrefer entre les pièces polaires et le stator, bifurque à droite et à gauche pour passer dans les deux pôles sud voisins après avoir traversé une seconde fois l'entrefer, et achève son parcours par le volant du rotor qui sert de culasse.

Le rotor tourne dans le sens indiqué par la flèche de la figure 2 en entraînant le flux magnétique.

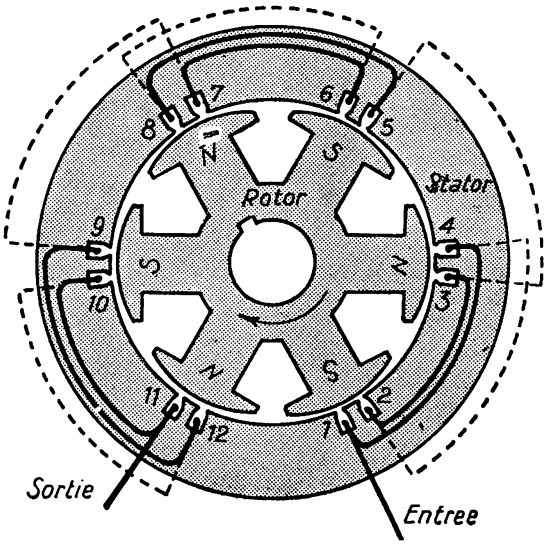


FIG. 2. — **Rotor, stator et enroulement** d'un alternateur à 6 pôles. Les connexions entre bobines sont représentées en pointillé.

Considérons les bobines 1-4 et 2-3 (fig. 2). Le flux sous le pôle sud balaye les conducteurs dans les encoches 1-2 et y induit des f. é. m. dirigées de l'avant de la figure vers l'arrière.

Devant les encoches 3-4, c'est un pôle nord qui se déplace; le sens

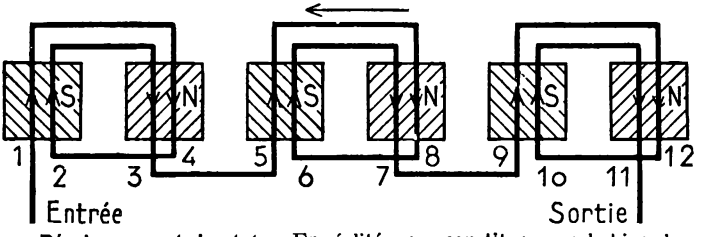


FIG. 3. — **Développement du stator.** En réalité, pour constituer une bobine, le conducteur passe plusieurs fois dans chaque encoche. Par exemple, la bobine 1-4 compte 16 tours de fil; il en est de même de la bobine 2-3 et de toutes les autres.

du flux est changé alors que celui du déplacement est resté le même : les f. é. m. induites dans les conducteurs des encoches 3 et 4 sont dirigées de l'arrière de la figure vers l'avant. Elles s'ajoutent donc à celles qui sont produites en même temps dans les conducteurs 1 et 2 qui constituent les deux autres côtés de la bobine.

Les phénomènes d'induction sont les mêmes dans les autres bobines. Il en résulte, à un instant donné, une f. é. m. d'un certain sens dans l'ensemble de l'enroulement.

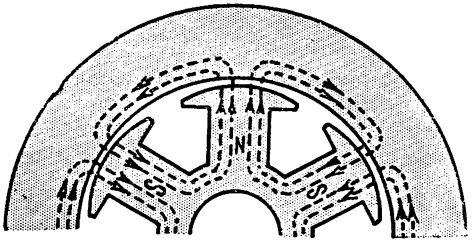


FIG. 4.
Distribution du flux dans une portion d'alternateur.

La rotation du rotor amène ensuite les pôles nord à la place des pôles sud. Le flux magnétique change de sens. La f. é. m. est inversée. Et ainsi de suite.

La f. é. m. produite est donc alternative.

La surface extérieure des pièces polaires n'est pas concentrique avec le stator : l'entrefer est plus grand aux extrémités des pièces polaires qu'au milieu (fig. 5). Le flux n'est pas uniforme dans l'entrefer. Par une courbure convenable de la surface des pièces polaires, les constructeurs obtiennent une distribution du flux magnétique et une f. é. m. induite pratiquement sinusoïdales.

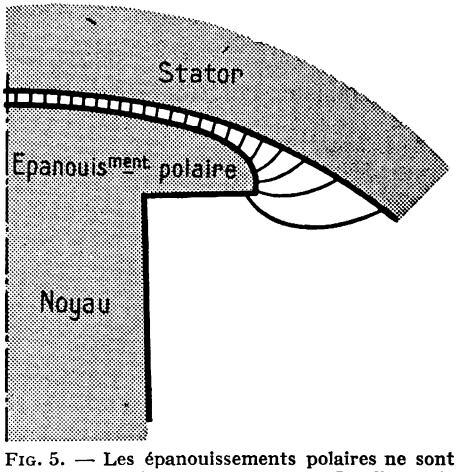


FIG. 5. — Les épanouissements polaires ne sont pas concentriques avec le stator. Les lignes de forces représentant le flux sont plus serrées dans l'axe du pôle que vers les cornes polaires. (Les encoches du stator ne sont pas figurées.)

4. Fréquence de la f. é. m. d'un alternateur.

Supposons que le rotor à 6 pôles de l'alternateur étudié tourne à 1 000 *tours par minute.*

Il fait un tour en 60 : 1 000 = 0,06 *seconde.* Une alternance de la f. é. m. se produit pendant le temps qu'un pôle nord met à rem-

placer, devant un côté de bobine, le pôle sud qui le précède dans le sens de rotation, soit en 0,06 : 6 = 0,01 *seconde.* Une période correspondant à deux alternances dure : 0,01 × 2 = 0,02 *seconde.* La fréquence de la f. é. m., nombre de périodes par seconde, a pour valeur :

1 : 0,02 = 50 *périodes par seconde.*

D'une façon générale, si le rotor porte 2*p* pôles, soit *p* pôles nord et *p* pôles sud, pour une vitesse de rotation de N *tours par minute,* en recommençant le calcul qui vient d'être effectué, nous trouvons que la fréquence de la f. é. m. de l'alternateur est :

$$f = \frac{p\,N}{60}.$$

La fréquence standard des secteurs français est 50 *périodes par seconde.* Les alternateurs des centrales électriques, pour donner cette fréquence, tournent donc à des vitesses fixes suivant leur nombre de pôles :

alternateurs à	2 pôles	: N = 3 000	*tours par minute*
—	4 pôles	: N = 1 500	—
—	6 pôles	: N = 1 000	—
.....			
—	80 pôles	: N = 75	—

5. F. é. m. d'un alternateur.

Comme la f. é. m. d'une dynamo multipolaire, la f. é. m. d'un alternateur est directement proportionnelle :

au flux fourni par un pôle, Φ *wébers;*
à la vitesse de rotation du rotor, *N tours par seconde;*
au nombre de paires de pôles, *p;*
au nombre de conducteurs de l'induit, *n.*

On l'exprime par la formule :

$$E = k\,p\,n\,N\,\Phi \text{ volts.} \qquad (1)$$

Le coefficient *k*, que l'on nomme *coefficient de Kapp,* dépend du nombre des encoches par pôle et de leur écartement, il tient compte de la loi de variation du flux dans l'entrefer et du facteur 1 : $\sqrt{2}$, puisque E est une f. é. m. efficace.

Parce que le coefficient *k* n'est pas le même pour des alternateurs de construction différente, la formule (1) n'a pas grande utilité.

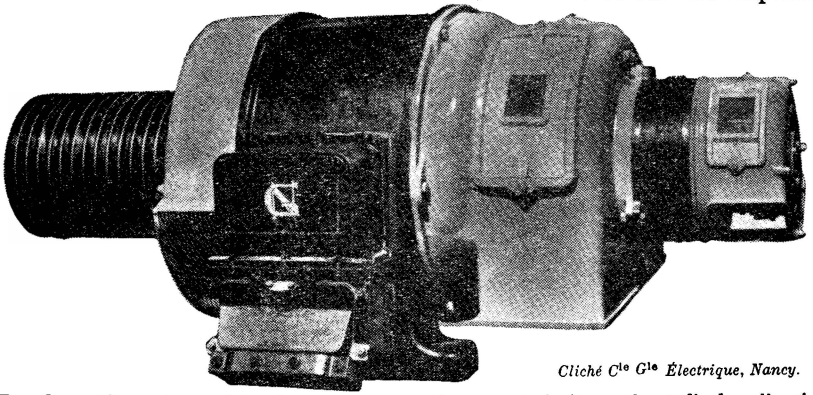
6. Réglage de la f. é. m. d'un alternateur.

Les nombres k, p, n de la formule

$$E = kpn\Phi$$

sont fixes pour un alternateur déterminé.

La vitesse de rotation N est variable, mais sa valeur est imposée



Cliché Cie Gle Électrique, Nancy.

FIG. 6. — **Alternateur triphasé de moyenne puissance.** A droite, en bout d'arbre, l'excitatrice; à gauche, une poulie pour commande par courroies trapézoïdales. Puissance : 150 kVA; tension : 220 V; vitesse : 750 t/mn.

par la fréquence qu'il s'agit d'obtenir, on ne peut la modifier pour régler E.

Reste Φ le flux inducteur. Il varie dans le même sens que le courant inducteur. *Augmenter ou diminuer ce courant est le seul moyen de réglage dont on dispose.*

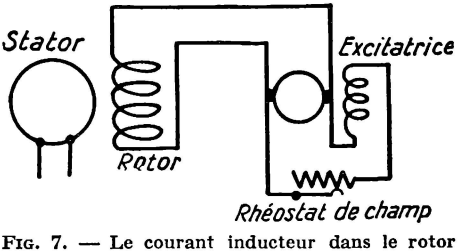


FIG. 7. — Le courant inducteur dans le rotor est réglé par le **rhéostat de champ** de l'excitatrice.

Le courant inducteur est le plus souvent fourni par une petite dynamo shunt, nommée **excitatrice,** dont l'induit est calé sur l'arbre de l'alternateur (fig. 6).

Au lieu de placer un rhéostat de réglage en série dans le circuit des bobines du rotor, on préfère, en général, *mettre un rhéostat de champ dans le circuit inducteur de l'excitatrice* (fig. 7). Le

réglage, qui s'effectue ainsi par la modification d'un courant peu intense, n'entraîne qu'une minime perte d'énergie.

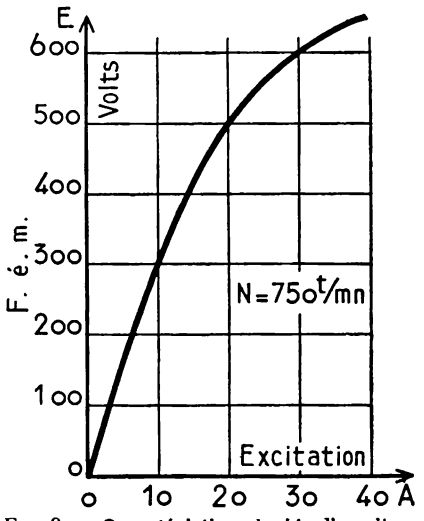


FIG. 8. — **Caractéristique à vide** d'un alternateur. Elle ressemble à celle d'une dynamo à courant continu.

7. Caractéristiques d'un alternateur.

a) La f. é. m. d'un alternateur fonctionnant à vide varie avec le courant inducteur comme la f. é. m. d'une dynamo. La *caractéristique à vide* a la même forme pour les deux types de machines (fig. 8).

b) En charge, la tension aux bornes d'un alternateur dépend à la fois du courant qu'il débite et du facteur de puissance du récepteur.

Il existe une *caractéristique en charge* pour chaque valeur de ce facteur de puissance.

c) La puissance réelle que fournit un alternateur dépend du facteur de puissance de l'installation qu'il alimente; aussi la puissance nominale caractéristique d'un alternateur s'indique-t-elle en *kilovolts-ampères*, c'est une *puissance apparente*.

B. — Turbo-alternateurs.

8. Ce sont des alternateurs construits pour une grande vitesse de rotation.

Le rotor est manchonné en bout de l'arbre d'une turbine à vapeur qui tourne à 3 000 ou 1 500 *tours par minute*.

A cause de la force centrifuge produite par ces grandes vitesses, le diamètre du rotor ne dépasse pas 1 *mètre* pour les machines bipolaires.

Les turbines à vapeur ne sont avantageuses que si elles sont de grande puissance. Aussi construit-on des turbo-alternateurs de 30 000, 80 000 et même 100 000 *kilowatts*.

On obtient cette puissance en allongeant le rotor et le stator jusqu'à 3 et 4 *mètres*, alors que cette longueur est de l'ordre de 30 *centimètres* pour les alternateurs à pôles saillants.

9. Inducteur et induit.

Inducteur. — Pour que l'inducteur soit solide et aussi pour diminuer les pertes par frottement dans l'air, le rotor est un cylindre lisse d'acier, quelquefois massif, parfois fait d'un empilement de tôles très épaisses.

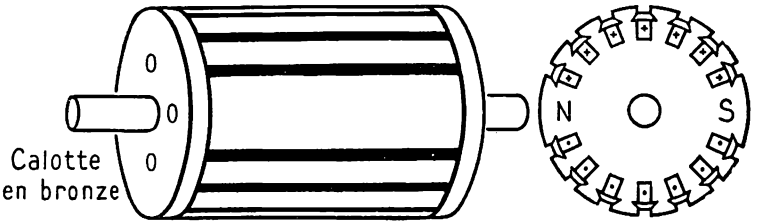


FIG. 9. — **Rotor lisse** d'un turbo-alternateur. A droite, remarquez les cales en bronze, à queue d'aronde, qui ferment les encoches.

Des encoches sont creusées suivant des génératrices pour loger les conducteurs; ces rainures sont fermées par des cales en bronze (*fig. 9*).

Induit. — Il est construit comme celui des alternateurs à pôles saillants. Les tôles sont séparées en plusieurs paquets laissant entre eux des intervalles de ventilation.

Parce que l'induit des alternateurs et des turbo-alternateurs est immobile, on peut isoler fortement ses conducteurs; aussi construit-on des alternateurs qui produisent des f. é. m. atteignant jusqu'à 15 000 *volts*.

C. — Alternateurs polyphasés.

11. Alternateurs triphasés.

En examinant la figure 2 qui représente l'essentiel d'un alternateur, vous constatez que les deux tiers de la surface intérieure du stator ne sont pas occupés par l'enroulement. Il y a place pour y percer 24 encoches en plus. On peut y loger deux autres enroulements identiques au premier (fig. 10). On obtient ainsi un alternateur qui fournit simultanéments trois f. é. m. distinctes et égales. L'induit possède trois entrées et trois sorties [1] (fig. 11).

1. Il n'y a aucune différence de propriétés entre les deux extrémités d'un circuit à courant alternatif. C'est arbitrairement que l'une des extrémités est nommée *entrée* et l'autre *sortie* du courant. On peut intervertir les deux noms. Mais quand il s'agit de plusieurs cir-

Pendant une période, le rotor tourne d'un angle correspondant à 12 encoches du stator. La f. é. m. alternative induite dans l'enroulement II, déplacé de 4 encoches par rapport à l'enroulement I, passe donc par les mêmes valeurs que celle de l'enroulement I un tiers de période plus tard : *la f. é. m. de* II *est déphasée d'un tiers de période en arrière de la f. é. m. de I.*

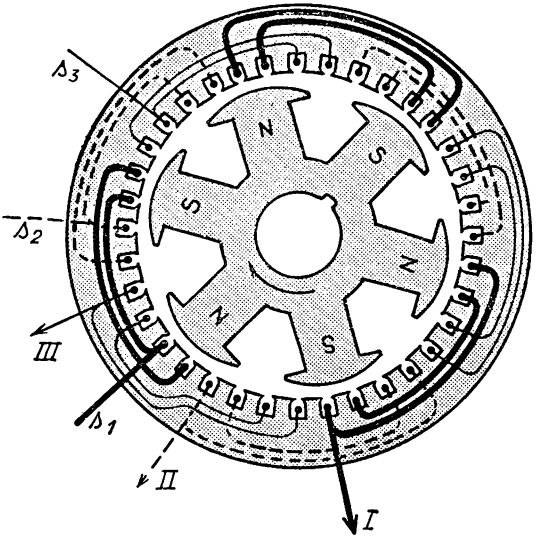


FIG. 10. — Deux enroulements ajoutés dans le stator de la figure 2 transforment la machine en un **alternateur triphasé.** (Les connexions entre bobines ne sont pas dessinées.)

De même, l'enroulement III est identique aux deux autres, mais déplacé de 4 encoches en avant dans le sens du mouvement par rapport à l'enroulement II : la f. é. m. dans l'enroulement III est donc déphasée d'un tiers de période en arrière de la f. é. m. de II et de deux tiers de période en arrière de la f. é. m. de I.

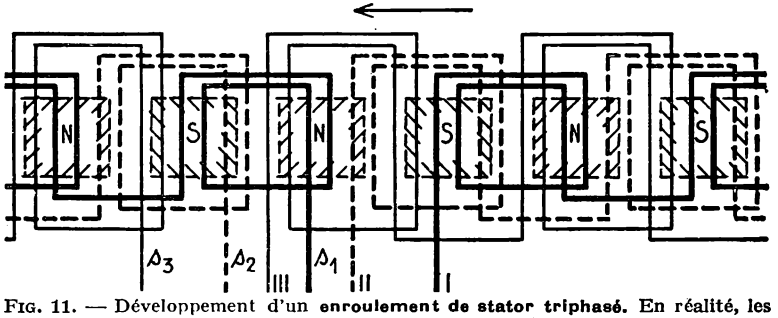


FIG. 11. — Développement d'un **enroulement de stator triphasé.** En réalité, les 12 bobines dessinées sont faites chacune de plusieurs tours de fil.

cuits semblables, les extrémités analogues par leur place ou le sens d'enroulement des conducteurs qui y aboutissent doivent être nommées de la même façon.

On donne à un tel alternateur le nom d'**alternateur triphasé.** Il produit un ensemble de **f. é. m. triphasées** pouvant entretenir dans trois circuits extérieurs des **courants triphasés.** Chacun des circuits où passe l'un des courants se nomme une **phase** de l'installation.

10. Alternateurs diphasés.

Au lieu de 24 encoches supplémentaires dans le stator de l'alternateur de la figure 10, on peut n'en ajouter que 12, placées comme l'indique la figure 12 et y loger un second enroulement identique au premier. L'alternateur obtenu fournit simultanément deux f. é. m. distinctes et égales. Le stator possède deux entrées et deux sorties.

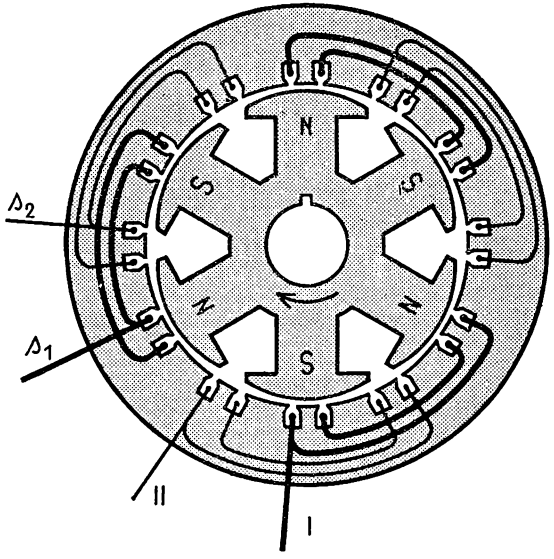


FIG. 12. — En ajoutant l'enroulement II, figuré en trait fin, on transforme l'alternateur de la figure 2 en un **alternateur diphasé.**

Repérez la position du rotor en rotation par rapport à l'enroulement I à un instant quelconque, vous constatez qu'il occupe une position semblable par rapport à l'enroulement II un quart de période plus tard. *La f. é. m. de II est donc déphasée d'un quart de période en arrière de la f. é. m. de I.*

On donne à un tel alternateur le nom d'**alternateur diphasé.** Il produit un ensemble de deux **f. é. m. diphasées,** et peut entretenir dans deux circuits extérieurs des **courants diphasés.**

Un alternateur construit pour ne fournir qu'une seule f. é. m. alternative est **monophasé;** une f. é. m. alternative considérée isolément est **monophasée;** un courant alternatif simple est **monophasé.**

Presque tous les alternateurs industriels sont triphasés. Ce n'est plus que dans quelques secteurs parisiens que l'on continue à distribuer des courants diphasés.

Les courants polyphasés possèdent une propriété de grande importance pratique : *ils produisent avec facilité des champs magnétiques tournants* comme vous le verrez dans une leçon ultérieure.

RÉSUMÉ

1. — Un alternateur se compose d'un *induit fixe* ou *stator* et d'un *inducteur mobile* ou *rotor*. Le stator porte un *enroulement* ouvert composé de conducteurs couplés en bobines mises en série.

Le rotor des *alternateurs à pôles saillants* est une couronne de noyaux d'électro-aimants nommés pôles. Ces pôles, en nombre pair (2p), sont alternativement nord et sud.

Le rotor des *turbo-alternateurs* est lisse. Des conducteurs, logés dans des encoches, y créent soit deux, soit quatre pôles.

Pour aimanter le rotor, du courant continu est fourni par une *excitatrice* montée en bout d'arbre.

2. — Le rotor, en tournant, induit une f. é. m. alternative dans l'enroulement du stator.

La fréquence de cette f. é. m. est $f = \frac{pN}{60}$ (N. est la vitesse du rotor en tours par minute.)

On règle la valeur de la f. é. m. par le *rhéostat de champ* de l'excitatrice.

3. — Le stator des *alternateurs triphasés* porte trois enroulements déplacés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de l'angle que font entre eux les axes de deux pôles de même nom consécutifs.

Celui des *alternateurs diphasés* comporte deux enroulements déplacés l'un par rapport à l'autre d'un quart de l'angle des axes de deux pôles de même nom consécutifs.

EXERCICES

1. Est-il possible de construire des alternateurs dont l'induit soit mobile et l'inducteur fixe? Quelle est la différence entre un tel alternateur et une dynamo à courant continu?

2. Dessiner le développement du stator diphasé de la figure 12.

3. Les alternateurs de la centrale hydraulique de Génissiat ont 40 pôles. A quelle vitesse tournent-ils pour fournir du courant à 50 *périodes par seconde?*

Réponse : 150 *t/mn.*

4. L'enroulement du rotor d'un alternateur de 100 *k*VA a une résistance de 1,60 Ω. L'excitatrice, dont la résistance d'induit est 0,125 Ω, fournit à pleine excitation une f. é. m. de 65 V.

Calculer :

1° l'intensité du courant d'excitation;

2° la puissance débitée par l'excitation;
3° le pourcentage, par rapport à la puissance de l'alternateur, de la puissance consommée pour l'excitation quand l'alternateur débite 100 kVA dans une installation dont le cos φ est 0,80.

Réponses : 37,6 A — 2,444 kW — 3,05 %.

5. L'alternateur à 6 pôles représenté par la figure 2 a 10 spires par encoche, il tourne à 1 000 *t/mn.* Le flux sous un pôle est 0,0 106 *wébers.* Le coefficient de Kapp qui lui est applicable est $k = 1{,}8$.
Calculer sa f. é. m.

Réponse : 114 V.

6. Un alternateur, fournissant du courant à 50 *p/s*, tourne à une vitesse d'environ 135 *tours par minute.*
Déterminer :
1° son nombre de pôles
2° sa vitesse exacte.

Réponses : 22 pôles; — 136 4/11 *t/mn.*

7. Les alternateurs de la Centrale hydraulique de Génissiat ont chacun une puissance nominale de 70 000 *kVA.*
Quelle est l'énergie fournie par l'un de ces alternateurs qui tourne jour et nuit pendant une année de 360 *jours* et débite dans un réseau dont le facteur de puissance est 0,80 ?

Réponse : environ 484 millions de *kWh.*

Courants polyphasés.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un voltmètre non polarisé, calibre 250 *ou* 300 volts.
Trois groupes de chacun 4 *lampes de* 60 watts, 115 volts, *montés sur* 3 *planchettes.*
Trois groupes de chacun 2 *lampes de* 200 watts, 200 volts, *montés sur* 3 *planchettes.*

LEÇON

I. COURANTS TRIPHASÉS

1. Représentation de trois courants triphasés.

Trois f. é. m. triphasées égales produisent dans trois récepteurs monophasés identiques des courants égaux, déphasés d'un tiers de période l'un par rapport à l'autre : ce sont des **courants triphasés.**

On représente trois courants triphasés, soit :

1° Par l'ensemble des trois formules suivantes :

$$\begin{cases} i_1 = I_m \sin \omega t \\ i_2 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_3 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right); \end{cases}$$

vous savez que l'angle $\frac{2\pi}{3}$ *radians* vaut 120°, l'angle $\frac{4\pi}{3}$ *radians* 240°;

2° Par les trois courbes séparées dans la figure 1 et rapprochées avec les mêmes axes de coordonnées dans la figure 2;

3° Par les trois vecteurs de la figure 3.

2. A chaque instant, la somme des intensités de trois courants triphasés sinusoïdaux égaux est nulle.

a) Nous vérifions cette propriété avec les trois courbes de la figure 1.
Le point A de l'axe des abscisses correspond à un instant déterminé *t.*

Mesurons sur la figure les intensités des trois courants représentées à une certaine échelle par les ordonnées A_1B_1, A_2B_2, A_3B_3. Les deux premières sont positives et valent 21 *ampères* et 16 *ampères*, la troisième est négative, elle égale — 37 *ampères*.

La somme algébrique de ces trois courants est nulle.

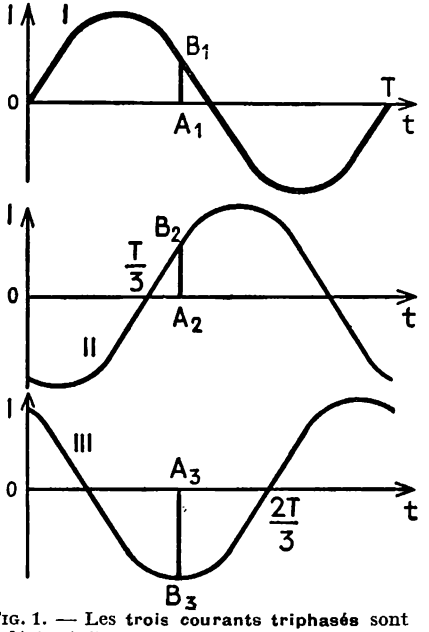


FIG. 1. — Les **trois courants triphasés** sont déphasés l'un par rapport à l'autre d'un tiers de période. La somme algébrique de trois ordonnées de même abscisse est nulle.

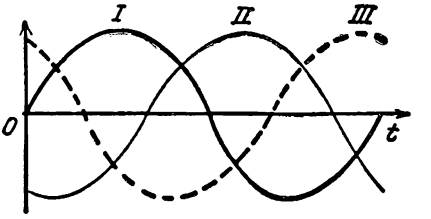


FIG. 2. — Les trois courbes de la figure précédente sont tracées avec les mêmes axes de coordonnées.

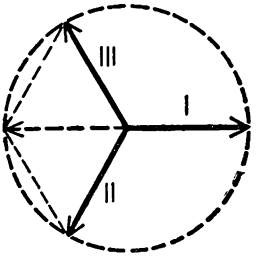


FIG. 3. — Ces trois vecteurs représentent un ensemble de **trois courants triphasés.**

b) Nous pouvons aussi composer les trois vecteurs de la figure 3. *Leur somme géométrique est nulle.*

c) En calculant, à l'aide de formules trigonométriques (nous ne ferons pas ce calcul), la somme au même instant t de trois courants triphasés c'est-à-dire l'expression :

$$\left[I_m \sin \omega t\right] + \left[I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right] + \left[I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right]$$

on *démontre* que cette somme est nulle quel que soit t.

Cette propriété importante n'appartient en toute rigueur qu'à des courants triphasés sinusoïdaux.

A. — Couplage en étoile de trois récepteurs monophasés.

3. Une ligne à trois fils suffit pour trois courants triphasés.

Soient trois récepteurs monophasés identiques, constitués chacun, par exemple, par 4 lampes de 60 *watts* en parallèle, branchées sur trois lignes doubles venant des bornes amenant les courants triphasés dans la salle de cours (fig. 4).

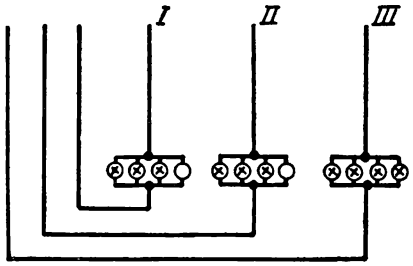


FIG. 4. — Trois récepteurs monophasés identiques sont branchés sur les trois phases d'une distribution triphasée.

Les fils d'entrée sont marqués I, II, III, l'intensité est la même dans les trois circuits. Réunissons en un seul les trois fils de sortie. Le courant dans le fil unique est la somme des trois courants triphasés, *cette somme est nulle, donc le fil est inutile et peut être supprimé.*

Vous constatez que le fonctionnement des trois groupes de lampes n'est pas modifié par cette suppression.

La ligne transportant les trois courants ne comprend que trois fils (fig. 5). Le point de réunion des trois bornes de sortie constitue le **point neutre.** On dit que les récepteurs sont couplés **en étoile** (fig. 6).

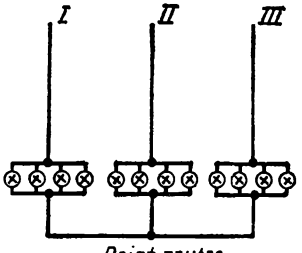


FIG. 5. — Les trois conducteurs de retour des courants au générateur sont supprimés.

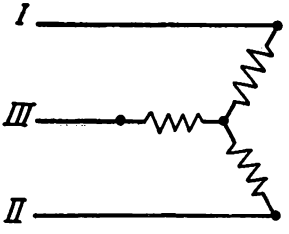


FIG. 6. — La figure 5 dessinée différemment justifie le nom de **couplage en étoile.**

4. Distribution en étoile à quatre fils.

Pour que la somme des courants aboutissant au *point neutre* soit nulle, il faut :

1° Que les courants soient sinusoïdaux : cette condition est pratiquement remplie par les courants que distribuent les secteurs;

2° Que les trois courants aient la même intensité et soient également déphasés l'un par rapport à l'autre.

On dit alors que **les trois phases sont équilibrées.** C'est le cas dans le montage de lampes que nous avons effectué.

Si ces conditions ne sont pas remplies **les trois phases sont déséquilibrées.** C'est le cas, par exemple, si la phase I alimente trois lampes, la phase II quatre lampes, la phase III 1 lampe; la résultante des trois courants, le premier de 1,5 *ampère*, le seconde de 2 *ampères*, le troisième de 0,5 *ampère*, n'est pas nulle, elle a pour valeur 1,3 *ampère*.

Il faut conserver le quatrième fil et réunir le point neutre de l'installation à un point neutre obtenu en connectant ensemble les trois bornes correspondantes du générateur triphasé (fig. 7).

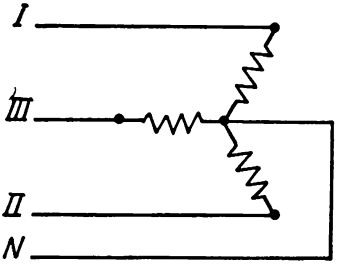


FIG. 7. — Couplage en étoile, alimentation par **quatre fils**, dont un fil neutre.

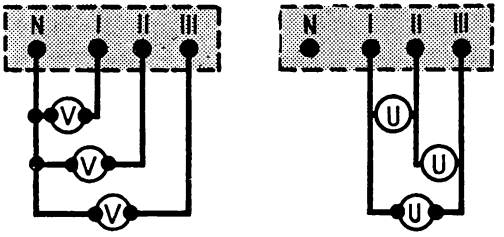


FIG. 8. — **Tableau de bornes** d'une distribution triphasée en étoile à quatre fils.

La ligne est faite alors de quatre fils : *trois fils de phases et un fil neutre* [1].

Ces quatre fils pénètrent dans la salle de cours et aboutissent, les fils de phases à trois bornes marquées I, II, III, le fil neutre à une quatrième borne marquée N (fig. 8).

5. Tensions simples et composées dans une distribution en étoile.

a) Sur le tableau d'arrivée du courant, mesurons :

1° Les tensions entre la borne neutre N et les bornes de phases I, II, III; nous trouvons $V_1 = V_2 = V_3 = 115$ *volts*, nous nommons ces tensions **tensions simples;**

2° Les tensions entre les bornes de phases, I et II, II et III, III et I; nous trouvons $U_1 = U_2 = U_3 = 200$ *volts;* ces tensions sont dites **tensions composées.**

1. Au poste de départ d'une ligne triphasée, le fil neutre est mis à la terre, c'est-à-dire réuni à une grande plaque de métal enfouie dans le sol. La tension entre le fil neutre et le sol est donc nulle. Les interrupteurs unipolaires doivent être placés sur le fil de phase.

b) Le rapport entre tension composée et tension simple est :

$$U : V = 200 : 115 = 1{,}73 = \sqrt{3}.$$

Nous pouvons démontrer cette relation importante :

$$\frac{\textit{Tension composée}}{\textit{Tension simple}} = \frac{U}{V} = \sqrt{3} \qquad (1)$$

en nous servant du diagramme vectoriel de la figure 9.

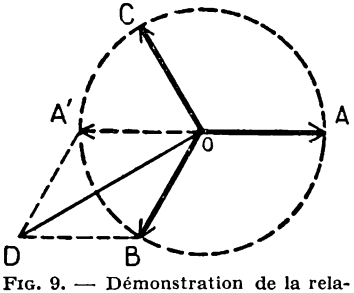


FIG. 9. — Démonstration de la relation $U = V\sqrt{3}$.

Les trois tensions simples sont représentées par les vecteurs de longueur V, $\overrightarrow{OA}$, $\overrightarrow{OB}$, $\overrightarrow{OC}$, faisant entre eux des angles de 120°. Les points A, B, C correspondent respectivement aux bornes I, II, III et le point O à la borne N.

Nous nous proposons de calculer la tension U entre les bornes I et II. Pour aller de A à B, nous suivons le vecteur $\overrightarrow{AO}$, puis le vecteur $\overrightarrow{OB}$. La tension entre A et B est donc la résultante des vecteurs — $\overrightarrow{OA}$, soit $\overrightarrow{OA'}$ et OB. Cette résultante est $\overrightarrow{OD}$. Puisque les droites égales OA' et OB font entre elles un angle de 60°, OD vaut 2 fois la hauteur du triangle équilatéral de côté OB, soit OB $\sqrt{3}$. Donc $U = V\sqrt{3}$.

En construisant de la même façon les tensions entre II et III, III et I, nous constatons que *les trois tensions composées sont aussi triphasées.* Elles forment un ensemble déphasé de $\frac{\pi}{6}$ en arrière du système de tensions simples.

Donc, une installation, alimentée par une ligne à quatre fils lui amenant trois tensions triphasées en étoile, dispose, si la tension simple est 115 *volts*, de

trois tensions monophasées de V = 115 *volts*,
trois tensions monophasées de U = 200 *volts*,
un système triphasé de 115 *volts*,
un système triphasé de 200 *volts*.

5. Puissance d'un récepteur triphasé couplé en étoile.

Ce récepteur est, par exemple, un moteur triphasé. Un tel moteur

constitué par trois enroulements identiques a ses trois phases équilibrées (fig. 10).

Trois fils alimentent le moteur, le courant est I dans chacun d'eux, U est la tension entre deux de ces fils (tension entre phases).

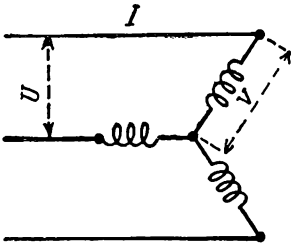


FIG. 10. — La **puissance absorbée** par un récepteur triphasé en étoile est $P = U.I.\sqrt{3}\cos\varphi$.

La puissance absorbée est la même dans chacune des trois phases du moteur. Le courant a la même intensité I dans chaque branche de l'étoile que dans la ligne. Si V est la tension entre un fil de ligne et le point neutre, la puissance absorbée par phase est VI *cos* φ, *cos* φ *étant le facteur de puissance résultant du déphasage de I sur V.* La puissance totale est donc :

$$P = 3\ VI\cos\varphi.$$

Comme $V = U : \sqrt{3}$

$$P = \frac{3UI\cos\varphi}{\sqrt{3}},$$

soit

$$\boxed{P = UI\sqrt{3}\cos\varphi} \qquad (2)$$

B. — Couplage en triangle de trois récepteurs monophasés.

6. Réalisation d'un couplage en triangle.

Trois récepteurs monophasés identiques sont constitués chacun par deux lampes de 200 *watts*, 200 *volts*.

Branchons chaque récepteur entre deux bornes de la distribution (*fig. 11*). A chacune de ces bornes aboutissent deux conducteurs. Nous pouvons en supprimer un en connectant ensemble les deux bornes correspondantes des récepteurs (fig. 12). Modifions la disposition du schéma pour le rendre plus clair : il prend l'aspect de la figure 13 qui justifie le nom de **couplage en triangle** donné à ce montage.

Vous voyez que *le couplage en triangle consiste à réunir la sortie du premier récepteur monophasé à l'entrée du second, la sortie du second à l'entrée du troisième et la sortie du troisième à l'entrée du premier.*

Une ligne de trois fils suffit pour alimenter un récepteur triphasé couplé en triangle.

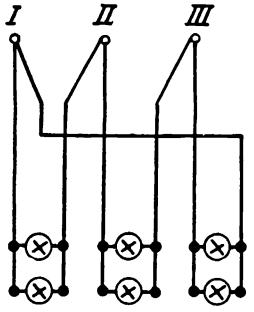


FIG. 11. — Trois récepteurs monophasés identiques sont branchés sur les trois bornes de phases d'une distibution triphasée.

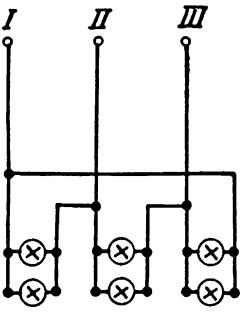


FIG. 12. — En couplant les récepteurs, on rend inutiles trois des 6 conducteurs de la figure 11.

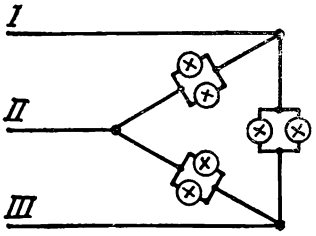


FIG. 13. — Cette disposition de la figure 12 justifie le nom de **couplage en triangle.**

7. Déterminons le rapport du courant I dans chaque fil de ligne au courant J dans chaque côté du triangle.

a) ***Expérience.*** — Mesurons le courant I dans un fil de ligne; nous trouvons 3,46 *ampères*, et le courant J dans un récepteur monophasé, nous trouvons 2 *ampères*.

Calculons le rapport I : J :

$$\frac{I}{J} = \frac{3{,}46}{2} 1{,}73 = \sqrt{3}.$$

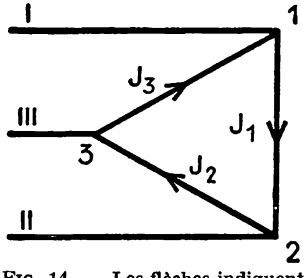


FIG. 14, — Les flèches indiquent le sens positif choisi sur les trois côtés du triangle.

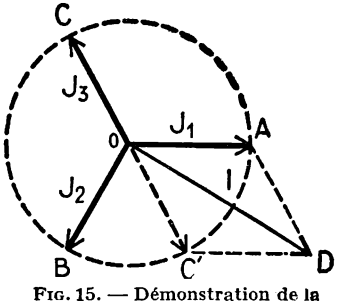


FIG. 15. — Démonstration de la formule $I = J\sqrt{3}$.

b) ***Démonstration.*** — Fixons un sens positif dans chaque côté du triangle, il est indiqué par une flèche dans la figure 14.

Le courant I_1 amené par le conducteur I au point 1 est la somme géométrique des courants J_1 et J_3, ce dernier est de sens négatif. Dans le diagramme de la figure 15, composons J_1 et $-J_3$ représentés par les vecteurs $\overrightarrow{OA}$ et $\overrightarrow{OC'}$. La composante est $\overrightarrow{OD}$. Puisque les deux droites égales OA et OC' font ensemble un angle de 60°, OD vaut deux fois la hauteur du triangle équilatéral OAC'. Donc

$$\boxed{I = J\sqrt{3}} \qquad (3)$$

8. Puissance d'un récepteur triphasé couplé en triangle.

Un tel récepteur est, par exemple, un moteur triphasé dont les trois enroulements sont couplés en triangle.

Trois fils alimentent le moteur, le courant est I dans chacun d'eux; U est la tension entre deux de ces fils (fig. 16).

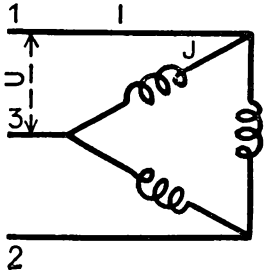


FIG. 16. — **La puissance absorbée** par un récepteur triphasé couplé en triangle est $P = U.\ I.\ \sqrt{3}.\cos\varphi$.

La puissance absorbée par le récepteur est trois fois la puissance d'une phase. En désignant par J le courant dans chaque côté du triangle, *par cos φ le facteur de puissance qui résulte du déphasage de J sur U*, la puissance dans une phase est UJ cos φ. La puissance du récepteur est donc $P = 3\ UJ\cos\varphi$.

En remplaçant J par sa valeur $I : \sqrt{3}$:

$$\boxed{P = UI\sqrt{3}\cos\varphi} \qquad (4)$$

9. Remarques.

1. Les deux formules (2) et (4) sont les mêmes.

Cette identité de forme signifie qu'il n'y a pas lieu de se préoccuper du mode de couplage d'un récepteur triphasé pour calculer sa puissance quand on connaît la tension entre phases, le courant dans les conducteurs d'alimentation, et le facteur de puissance du récepteur.

Il n'en faut pas conclure qu'on ne modifie pas la puissance du récepteur en changeant son couplage. En réalité, le changement de couplage modifie l'intensité dans la ligne d'alimentation quand la tension reste la même.

Soient U la tension entre les fils d'alimentation et Z l'impédance de l'un des trois récepteurs couplés ensemble.

Dans le cas d'un ***couplage en triangle***, la tension est appliquée entre les extrémités de chacun des récepteurs élémentaires. Le courant dans chaque récepteur est $J = U : Z$ et le courant en ligne

$$I_l = J\sqrt{3} = \frac{U\sqrt{3}}{Z}.$$

Dans le cas d'un ***couplage en étoile***, la tension appliquée aux bornes de chaque récepteur élémentaire est $V = U : \sqrt{3}$. Le courant dans une branche de l'étoile, qui est aussi le courant en ligne, est :

$$I_e = V : Z = \frac{U}{\sqrt{3}\,Z}.$$

Donc $I_l = 3I_e$.

En passant du couplage en étoile au couplage en triangle, le courant dans la ligne d'alimentation est triplé. Il en est de même de la puissance du récepteur, puisque la tension reste la même.

2. Tout ce qui a été dit pour un récepteur triphasé vaut pour un générateur Un générateur triphasé est couplé soit en étoile, soit en triangle. La f. é. m. composée est $\sqrt{3}$ fois plus grande en étoile qu'en triangle.

3. Les générateurs et les récepteurs triphasés qui sont branchés sur le même réseau de distribution ne sont pas obligatoirement couplés de la même façon : certains peuvent l'être en triangle et d'autres en étoile.

II. — COURANTS DIPHASÉS

10. Représentation de deux courants diphasés.

Deux f. é. m. égales diphasées produisent, dans deux récepteurs mono-

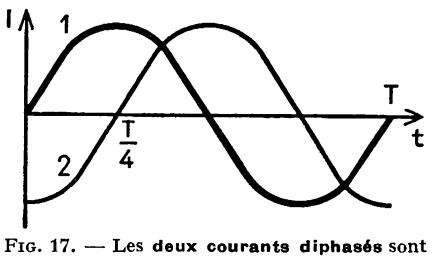


FIG. 17. — Les **deux courants diphasés** sont déphasés l'un par rapport à l'autre d'un quart de période.

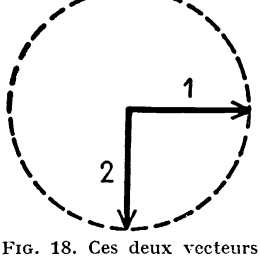


FIG. 18. Ces deux vecteurs représentent un système de **courants diphasés**.

phasés identiques, des courants égaux déphasés d'un quart de période l'un par rapport à l'autre : ce sont des **courants diphasés.**

On représente deux courants diphasés, soit :

1° par les deux relations suivantes :

$$\begin{cases} i_1 = I_m \sin \omega t \\ i_2 = I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \end{cases}$$

2° par les deux courbes rapprochées dans la figure 17;

3e par les deux vecteurs de la figure 18.

11. On transporte deux courants diphasés avec une ligne à quatre fils ou à trois fils.

a) Les deux récepteurs monophasés alimentés par les deux courants

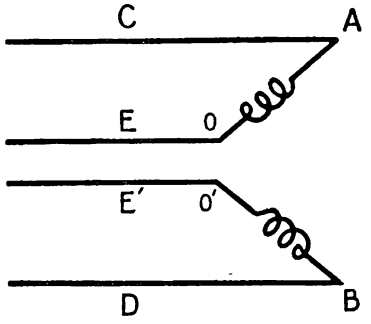


FIG. 19. — Les deux récepteurs monophasés OA et O'B son indépendants : la ligne les alimentant en courants diphasés est à **quatre fils.**

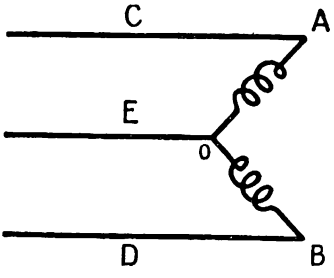


FIG. 20. — Une ligne à trois fils suffit pour alimenter un récepteur diphasé.

peuvent être tout à fait indépendants, la ligne de distribution est faite alors de quatre conducteurs (fig. 19).

b) Il est possible de réunir, d'une part, les deux sorties de récepteurs monophasés, d'autre part, les deux bornes correspondantes du générateur diphasé. La ligne transportant les deux courants comprend alors trois conducteurs (fig. 20).

12. Courants et tensions dans une distribution diphasée à trois fils.

Soient I le courant dans les fils extrêmes C et D et V la tension simple entre E et C, ainsi qu'entre E′ et D.

1° Les deux courants sont déphasés de $\frac{\pi}{2}$, ils se réunissent en O. Représentons-les par les deux vecteurs $\overrightarrow{OA}$ et $\overrightarrow{OB}$ perpendiculaires de même longueur I (fig. 21).

Le courant dans le conducteur commun E est figuré par la somme des vecteurs $\overrightarrow{OA}$ et $\overrightarrow{OB}$. Cette somme est la diagonale OC du carré de côté I. Sa longueur est $I\sqrt{2}$.

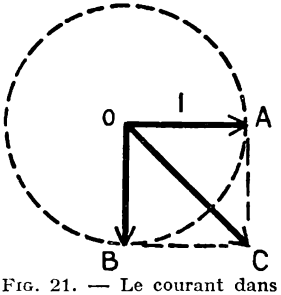


FIG. 21. — Le courant dans le fil commun d'une ligne diphasée est $I\sqrt{2}$.

Donc, *dans le conducteur commun le courant est* $I\sqrt{2}$.

2° Les deux tensions simples V sont déphasées de $\frac{\pi}{2}$. En les composant, on trouve pour *la tension composée U entre les fils extrêmes C et D*

$$U = V\sqrt{2}.$$

Chaque récepteur monophasé absorbe VI cos φ. La puissance du récepteur diphasé est donc :

$$P = 2VI \cos \varphi$$

ou en remplaçant V par U : $\sqrt{2}$:

$$\boxed{P = UI\sqrt{2} \cos \varphi.}$$

RÉSUMÉ

1. — A tout instant, la somme des intensités instantanées de trois courants triphasés est nulle. Il en résulte qu'un récepteur triphasé, composé de trois éléments monophasés identiques, peut être couplé en *étoile* ou en *triangle*.

2. — Dans un *couplage en étoile*, la tension composée U et la tension simple V sont liées par la relation $U = V\sqrt{3}$. La puissance d'un appareil triphasé en étoile est $P = UI\sqrt{3} \cos \varphi$.

Trois fils suffisent pour alimenter une installation en étoile si les trois phases sont équilibrées. Un quatrième fil, dit *fil neutre*, est nécessaire si les phases sont déséquilibrées.

3. — Dans un *couplage en triangle*, le courant I dans les fils d'alimentation et J dans chaque branche du triangle sont liés par la relation

$$I = J\sqrt{3}.$$

La puissance d'un appareil triphasé en triangle est $P = UI\sqrt{3} \cos \varphi$.
Pour alimenter un récepteur triphasé en triangle, il suffit d'une ligne de trois conducteurs.

4. — En passant du couplage en étoile d'un récepteur triphasé à son couplage en triangle, on triple sa puissance si la tension d'alimentation reste la même.

5. — Dans une distribution diphasée à trois fils, quand le courant est I dans les deux fils de phases, il est $I\sqrt{2}$ dans le fil commun. Entre la tension simple V et la tension composée U existe la relation $U = V\sqrt{2}$. La puissance d'un récepteur diphasé est $P = UI\sqrt{2} \cos \varphi$.

EXERCICES

1. Quel avantage y a-t-il à placer les interrupteurs unipolaires de lampes sur les fils de phases dans les installations à quatre fils?

2. Dans le couplage en triangle d'un récepteur ou d'un générateur triphasé, utilise-t-on la propriété que possèdent trois tensions triphasées d'avoir une somme nulle?

3. Le neutre des distributions en étoile à quatre fils est mis à la terre. Comment, en se servant d'un voltmètre, distinguer le fil neutre d'un fil de phase?

4. 1° Dans le montage en étoile à trois fils de la figure 5, comment fonctionneraient les lampes restantes si l'on supprimait une lampe dans la phase II et deux lampes dans la phase III? Faire l'expérience pour vérifier la réponse.

2° Même question et même expérience dans le cas d'un montage en étoile avec fil neutre.

3° Dans le montage en triangle de la figure 13, comment fonctionneraient les lampes restantes si l'on supprimait une lampe dans une branche du triangle et deux lampes dans une autre? Vérifier expérimentalement la réponse.

5. Un alternateur triphasé couplé en étoile fournit normalement 70 000 kVA sous 15 000 V. Calculer le courant dans chaque phase du stator.

Quelle serait la tension entre ses bornes si l'on couplait l'alternateur en triangle?

Quelle serait sa puissance apparente s'il fonctionnait en triangle avec la même intensité de courant dans ses enroulements que lors de son fonctionnement normal en étoile?

Réponses : 2 694 A — 8 660 *V* — 70 000 *kVA*.

6. Un atelier est alimenté par une ligne triphasée en étoile à quatre fils. La tension entre phases est 200 V. L'installation comprend 30 lampes à incandescence de 60 W montées en étoile équilibrée et un moteur de 10 *ch* dont le rendement est 0,90 et le facteur de puissance 0,80.

1° Calculer le courant dans les fils de ligne quand les lampes fonctionnent seules.

2° Calculer le courant en ligne quand le moteur fonctionne seul.

3° Calculer le courant en ligne quand lampes et moteurs fonctionnent simultanément.

4° Calculer dans ce cas le facteur de puissance de l'installation.

Réponses : 5,2 *A* — 29,4 *A* — 33,7 *A* — 0,85.

NOTE COMPLÉMENTAIRE

Ordre des phases de trois tensions triphasées.

1. Ordre normal des phases.

L'une des tensions est choisie arbitrairement comme phase 1.

La seconde est celle qui est déphasée de 120° *en arrière* de la phase 1. La troisième est alors déphasée de 120° en arrière de la phase 2.

Cet ordre normal correspond au diagramme de la figure 22.

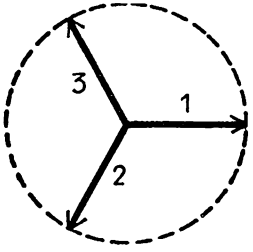


FIG. 22. — Diagramme de trois tensions triphasées dans leur ordre normal.

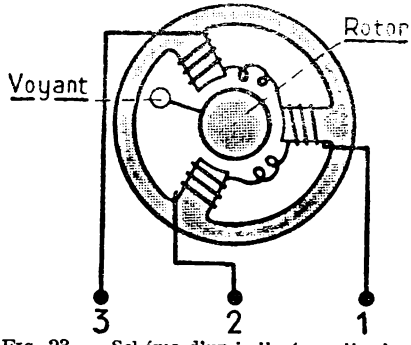


FIG. 23. — Schéma d'un **indicateur d'ordre des phases** à champ tournant.

Le repérage des phases est nécessaire dans certains montages, par exemple dans celui des compteurs triphasés, notamment des compteurs d'énergie réactive. On l'effectue avec des appareils nommés ***indicateurs d'ordre des phases.***

2. Description de deux modèles d'indicateurs d'ordre des phases.

L'un, schéma figure 23, utilise une propriété que nous étudierons à propos des moteurs asynchrones triphasés.

Trois petites bobines dont les noyaux font corps avec la même culasse circulaire, alimentées respectivement par l'une des tensions triphasées à repérer, agissent sur un rotor central en aluminium. Le rotor tend à tourner. Sa rotation s'effectue dans *le sens du mouvement des aiguilles d'une montre* si les phases des tensions essayées sont rangées dans l'ordre normal indiqué par le numérotage des bornes de l'appareil.

Le mouvement du rotor est limité par deux butées. Il fait apparaître un voyant derrière l'une des deux petites fenêtres ménagées sur le couvercle de l'instrument,

derrière celle de droite si l'ordre des phases essayé est normal, derrière celle de gauche si cet ordre est incorrect.

Un autre modèle est représenté schématiquement par la figure 24. Les trois phases à vérifier, reliées aux bornes marquées 1, 2, 3, alimentent une petite lampe au néon. R_1, R_2, R_3 sont des résistances, C un condensateur. La lampe s'éteint

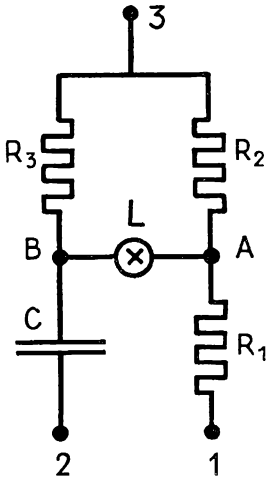


FIG. 24. — Constitution d'un **indicateur d'ordre des phases à lampe au néon.**

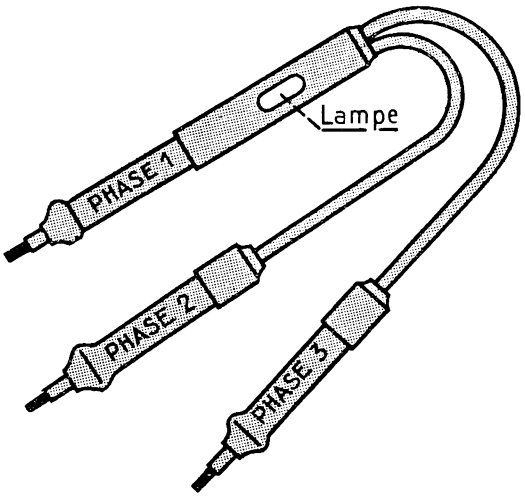


FIG. 25. — Aspect extérieur de l'indicateur dont la figure 24 est le schéma.

si les trois phases sont dans l'ordre normal. Elle s'illumine dans le cas contraire (fig. 25).

Nous proposons aux élèves habiles d'expliquer le fonctionnement de l'appareil en déterminant graphiquement les tensions aux points A et B du montage dans les deux cas d'alimentation.

Le guipage des conducteurs des installations importantes et soignées est de couleur différente suivant les phases : ***vert***, pour la phase 1, ***jaune*** pour la phase 2, ***brun*** pour la phase 3; les fils neutres sont ***gris***.

Transformateurs monophasés.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un transformateur monophasé démontable avec son jeu de bobines (voir 40e leçon).
Deux voltmètres, 150 *et* 300 volts.
Deux ampèremètres, 15 ampères.
Un rhéostat de charge pouvant absorber 12 ampères *sous* 60 volts.

LEÇON

A. — Description d'un transformateur monophasé.

Un transformateur monophasé se compose d'une *carcasse* et de *deux enroulements.*

1. Carcasse d'un transformateur monophasé.

C'est un **circuit magnétique** fermé, en tôles minces au silicium pour réduire les pertes par courants de Foucault et par hystérésis, fait de deux *colonnes* ou *noyaux* réunis par deux *ponts* ou *traverses* (fig. 1).

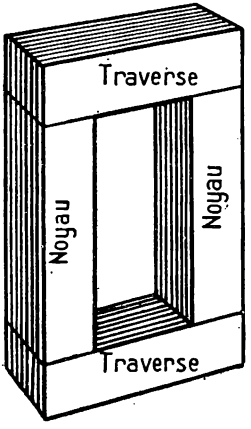


FIG. 1. — **Circuit magnétique** d'un transformateur monophasé.

On cherche à obtenir le plus petit en-

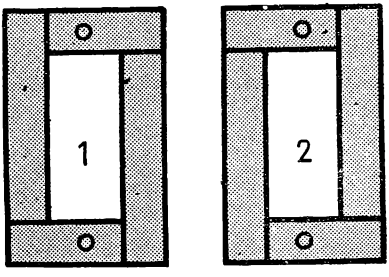


FIG. 2. — Empilage des tôles du circuit magnétique d'un transformateur en enchevêtrant les joints : 1, couches impaires; 2, couches paires.

trefer possible dans l'assemblage des noyaux avec les traverses. Un mode de construction très employé consiste à empiler les tôles une à une en croisant les joints comme l'indique la figure 2. Les ponts sont serrés entre deux fortes traverses en bois dur.

Ponts et colonnes sont ainsi en contact sur une très large surface et les entrefers sont négligeables.

2. Enroulements du transformateur.

Deux enroulements sont disposés sur les noyaux.

L'un d'eux est destiné à être branché sur la source d'énergie : c'est le **primaire,** l'autre à débiter dans les récepteurs : c'est le **secondaire.**

Les deux enroulements ont presque toujours des nombres de spires différents. A celui qui en a le plus on donne le nom d'**enroulement haute**

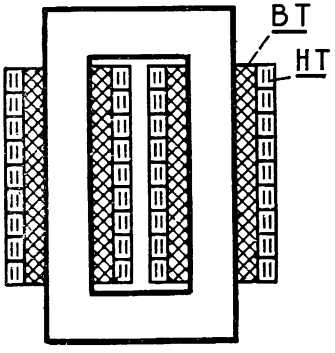


FIG. 3. — Les deux enroulements sont **concentriques** et répartis sur les deux colonnes du transformateur.

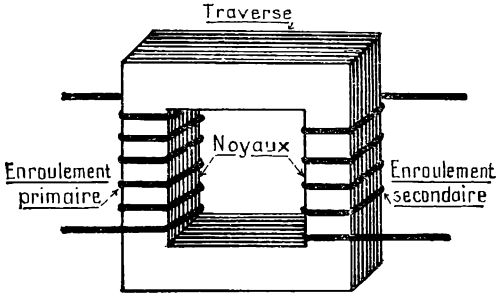


FIG. 4. — Représentation simplifiée d'un transformateur. **En réalité,** on ne place jamais un seul enroulement par noyau.

tension (HT), l'autre est l'**enroulement basse tension** (BT). L'enroulement HT peut être le primaire ou le secondaire suivant le mode d'emploi du transformateur.

Chaque enroulement est réparti sur les deux noyaux (fig. 3). Dans la figure 4, pour plus de clarté, un enroulement est figuré sur un noyau et l'autre enroulement sur le second noyau. Cette séparation n'est jamais réalisée dans les transformateurs industriels. Elle facilite les *fuites magnétiques*, c'est-à-dire qu'une partie du flux produit par chacune des bobines se ferme dans l'air sans traverser l'autre bobine et le transformateur fonctionne mal.

Les deux enroulements sont fortement isolés l'un par rapport à l'autre et à la carcasse.

Ils sont faits soit de galettes superposées et alternées, les extrêmes appartenant à la BT (fig. 5), soit de bobines concentriques ; la bobine HT divisée en plusieurs parties, entourant la bobine BT (fig. 3).

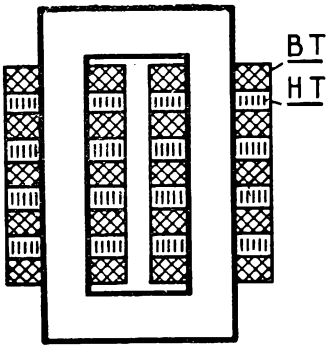


FIG. 5. — Les deux enroulements sont constitués par des **bobines alternées.**

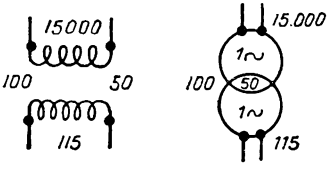


FIG. 6. — **Symboles d'un transformateur.** Ils sont accompagnés des caractéristiques électriques de l'appareil. Lire : transformateurs monophasés, 50 p/s, 115 — 15 000 V_1 100 *kVA*.

La figure 6 réunit les symboles employés pour représenter des transformateurs dans les schémas d'installations électriques.

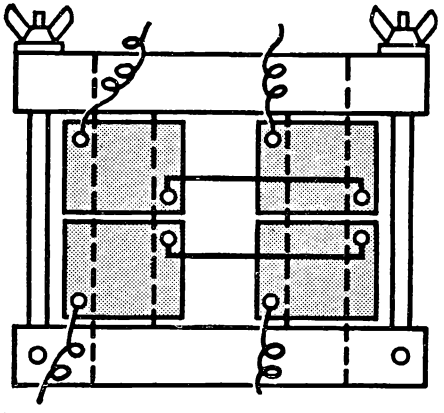


FIG. 7. — **Transformateur démontable.** La traverse supérieure s'enlève facilement pour changer les bobines.

B. — Étude expérimentale d'un transformateur monophasé.

3. Transformateur démontable pour expériences de cours.

C'est un petit transformateur construit pour que l'on puisse changer facilement les enroulements (fig. 7).

La traverse supérieure, serrée sur les noyaux par deux boulons, s'enlève et se replace rapidement. Chaque enroule-

ment est constitué par deux bobines enfilées chacune sur un noyau et mises en série ou en parallèle. On dispose de plusieurs paires de bobines d'un nombre différent de spires.

4. Fonctionnement d'un transformateur à vide.

C'est-à-dire sans que le secondaire débite du courant.

1° L'enroulement primaire compte 360 spires (deux bobines de 180 spires en série), l'enroulement secondaire 720 spires (deux bobines de 360 spires en série). Un voltmètre et un ampèremètre sont montés dans le circuit primaire, un voltmètre est en dérivation aux bornes du secondaire (fig. 8).

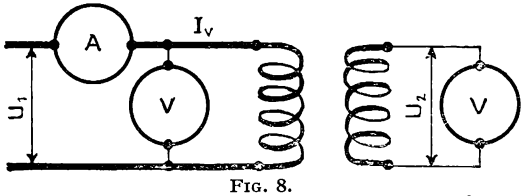


FIG. 8.
Montage pour l'étude d'un **transformateur à vide.**

Branchons le primaire sur la prise de courant du secteur.

Les lectures faites donnent les résultats suivants :

Primaire : Spires : $n_1 = 360$ Tension : $U_1 = 115\ V$ Intensité : $I_v = 2A$.
Secondaire : Spires : $n_2 = 720$ Tension : $U_2 = 228\ V$ Intensité : $I_2 = 0$.

2° Recommençons l'expérience après avoir mis 180 spires (deux bobines de 90 spires en série) au secondaire.

Primaire : Spires : $n_1 = 360$ Tension : $U_1 = 115\ V$ Intensité : $I_v = 2A$.
Secondaire : Spires : $n_2 = 180$ Tension : $U_2 = 57\ V$ Intensité : $I_2 = 0$.

Interprétation. — Pour chacune des expériences, comparons le rapport $n_1 : n_2$ des nombres de spires au primaire et au secondaire au rapport $U_1 : U_2$ des tensions primaire et secondaire.

1re *expérience :* $\dfrac{n_1}{n_2} = \dfrac{360}{720} = 0{,}5$; $\qquad \dfrac{U_1}{U_2} = \dfrac{115}{228} \simeq 0{,}5.$

2e *expérience :* $\dfrac{n_1}{n_2} = \dfrac{360}{180} = 2$; $\qquad \dfrac{U_1}{U_2} = \dfrac{115}{57} \simeq 2.$

Dans les deux cas, ces rapports sont presque égaux : *le rapport des nombres de spires des deux enroulements est à peu près égal au rapport des tensions entre les bornes de chacun des enroulements :*

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

On donne au rapport $\frac{n_1}{n_2}$ le nom de **rapport de transformation** du transformateur.

Remarque. — Dans la première expérience, le transformateur fonctionne comme **élévateur de tension,** dans la seconde comme **abaisseur de tension.** Dans les deux cas, l'enroulement primaire reste le même parce que la tension primaire est inchangée.

5. Fonctionnement d'un transformateur en charge.

Ajoutons au secondaire un rhéostat pouvant supporter une douzaine

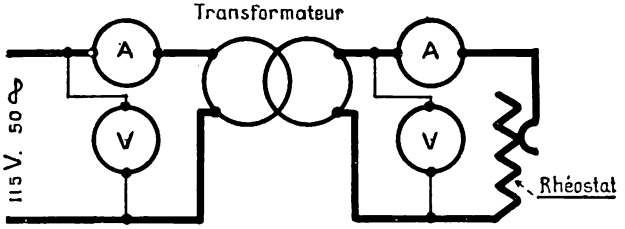


FIG. 9. — Montage pour l'étude d'un **transformateur en charge.**

d'ampères, avec un ampèremètre en série (fig. 9). Il y a 360 spires au primaire et 180 spires au secondaire du transformateur.

a) En manœuvrant le rhéostat pour augmenter le courant débité par le secondaire, nous constatons que le courant absorbé par le primaire croît en même temps : on dit que le transformateur est **autorégulateur.**

b) Effectuons plusieurs séries de lectures des appareils de mesure au voisinage de la charge normale du transformateur, nous obtenons par exemple :

1re Expérience

Primaire : Spires : $n_1 = 360$ Tension : $U_1 = 115\,V$ Intensité : $I_1 = 5{,}2A$.
Secondaire: Spires : $n_2 = 180$ Tension : $U_2 = 54\,V$ Intensité : $I_2 = 10A$.

2e Expérience

Primaire : Spires : $n_1 = 360$ Tension : $U_1 = 115\,V$ Intensité : $I_1 = 6{,}3A$.
Secondaire : Spires : $n_2 = 180$ Tension : $U_2 = 53{,}2\,V$ Intensité : $I_2 = 12A$.

Interprétation. — *a)* En charge, quand le transformateur débite à peu près sa puissance normale, le rapport des nombres des spires des deux enroulements est encore à peu près égal au rapport des tensions aux bornes :

$$\boxed{\frac{n_1}{n_2} \simeq \frac{U_1}{U_2}} \qquad (1)$$

b) Dans les deux expériences, le rapport $\frac{n_1}{n_2} = 2$ est à peu près égal au rapport $\frac{I_2}{I_1}$. Donc :

$$\frac{n_1}{n_2} \simeq \frac{I_2}{I_1} \qquad \text{ou}$$

$$\boxed{n_1 I_1 \simeq n_2 I_2} \qquad (2)$$

Ainsi, *au voisinage de la charge normale, les intensités primaire et secondaire sont inversement proportionnelles aux nombres de spires primaires et secondaires.*

La relation (2) montre que les courants primaire et secondaire varient proportionnellement, autrement dit que le transformateur est *autorégulateur.*

Vous avez remarqué que les relations (1) et (2) ne sont vérifiées par les expériences qu'à quelques pour cent près. Cette approximation serait meilleure si le transformateur étudié était plus puissant. Vous allez en voir la raison.

C. — Théorie simplifiée du transformateur monophasé.

6. Fonctionnement à vide.

Le courant secondaire est nul. Le courant à vide I_v qui parcourt alors le primaire produit seul le flux alternatif dans le circuit magnétique du transformateur. Ce flux crée dans le primaire une force centre-électromotrice d'induction s'opposant à la tension U_1 appliquée aux bornes. En désignant par E cette f. c. é. m. dans une spire elle est n_1 E pour tout l'enroulement primaire.

Bien que la résistance soit petite, le courant I_v est faible, c'est parce

que la f. c. é. m. d'induction équilibre presque exactement la tension primaire U_1, d'où :

$$n_1 E = U_1.$$

L'enroulement secondaire est aussi traversé par le flux dû à l'enroulement primaire. Dans chacune de ses spires s'induit une f. é. m. de E *volts*, et la tension aux bornes du secondaire est :

$$U_2 = n_2 E.$$

Donc

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

La relation (1) est démontrée.

Par exemple, dans le cas du transformateur démontable employé, on applique 115 *volts* au primaire de 360 spires. La f. c. é. m. par spire primaire est :

$$E = 115 : 360 = 0{,}32 \text{ volts.}$$

On obtient 2 000 *volts* au secondaire avec :

$$n_2 = 2\,000 : 0{,}32 = 6\,250 \text{ spires}$$

et seulement 6 *volts* avec :

$$n_2 = 6 : 0{,}32 = 18 \text{ spires.}$$

7. Transformateur en charge.

Le primaire étant alimenté sous la tension efficace constante U_1, la f. é. m. induite dans chaque spire E doit être à peu près constante quelle que soit la charge. Il en résulte que le flux qui induit cette f. é. m. doit avoir la même valeur maximale à vide et en charge :

Un transformateur fonctionne à flux maximal constant quelle que soit la charge.

A vide, seul les ampères-tours $n_1 I_v$ produisent le flux.

En charge, le flux est produit par les ampères-tours primaire et secondaire. Leur somme doit assurer le même flux que $n_1 I_v$. Le courant primaire I_1 est donc formé du courant à vide I_v et d'un courant qui compense l'action des ampères-tours secondaires. Généralement, le courant I_v est négligeable, on a alors :

$$n_1 I_1 = n_2 I_2$$

c'est la relation (2)

Par exemple, quand le transformateur démontable débite 10 *ampères* au secondaire qui compte 180 spires, il se produit $10 \times 180 = 1\,800$ *ampères-tours* antagonistes, que le primaire compense en absorbant $1\,800 : 360 = 5$ *ampères*.

8. La théorie qui précède est très simplifiée.

Vous avez certainement remarqué qu'elle néglige plusieurs faits, *A vide*, le courant primaire subit une chute de tension due à la résistance du conducteur de l'enroulement et correspondant à une perte en chaleur Joule. La f. c. é. m. n'équilibre qu'une tension un peu inférieure à U_1.

En charge le courant primaire est devenu plus grand la chute de tension a augmenté la f. é. m. par spire primaire et secondaire est devenue plus faible donc la tension secondaire a diminué. Le courant secondaire crée aussi une chute ohmique de tension dans son enroulement.

Il n'est pas non plus tenu compte des pertes magnétiques dans la carcasse, ni des déphasages des courants sur les tensions.

En somme, la théorie exposée suppose que le transformateur est parfait, c'est-à-dire sans pertes, restituant au secondaire toute l'énergie qu'il reçoit au primaire.

9. Un transformateur est réversible.

Soit un transformateur construit pour une tension U à la BT et U' à la HT. La théorie précédente montre qu'il est **réversible,** c'est-à-dire qu'on peut l'employer de deux façons :

1° La BT est le *primaire,* on l'alimente à la tension U et l'on obtient la tension U' au *secondaire* HT;

2° La HT est le *primaire,* on l'alimente à la tension U' et l'on recueille une tension U au *secondaire* BT.

Les deux tensions U et U' sont déterminées non seulement par les nombres de spires des deux enroulements, mais aussi par la f. é. m. par spire prévue par le constructeur et résultant de la valeur du flux dans le circuit magnétique. *Ne croyez pas qu'un transformateur quelconque puisse être employé sous n'importe quelle tension.*

RÉSUMÉ

1. — Un transformateur monophasé est fait d'une carcasse magnétique et de deux enroulements.

L'enroulement qui compte le plus de spires est l'enroulement HT, l'autre est l'enroulement BT.

L'enroulement branché sur la ligne qui fournit l'énergie électrique est le *primaire,* l'enroulement qui débite le courant transformé est le *secondaire.*

2. — Le *rapport de transformation* d'un transformateur est égal au rapport $\frac{n_1}{n_2}$ des nombres de spires des deux enroulements.

Les deux relations :

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad \text{et} \quad n_1 I_1 = n_2 I_2$$

expriment les propriétés principales d'un transformateur.

3. — Un transformateur alimenté par la BT est *élévateur de tension ;* alimenté par la HT, il est *abaisseur de tension.*

Un même transformateur peut être monté de l'une ou de l'autre façon sur les tensions convenables : on dit qu'un transformateur est *réversible.*

Quand le courant I_2 fourni par le secondaire d'un transformateur varie, le courant I_1 absorbé par le primaire varie dans le même sens. Cette propriété, précisée par la relation $n_1 I_1 = n_2 I_2$, se nomme *autorégulation* du transformateur.

EXERCICES

1. Un transformateur 230 — 115 V peut-il être employé pour 460 — 230 V? Justifier la réponse en considérant d'abord le circuit magnétique, ensuite les deux enroulements.

2. Un transformateur calculé pour 50 p/s peut-il être employé pour 25 p/s? Justifier la réponse.

3. Quelle est l'influence d'un entrefer dans le circuit magnétique d'un transformateur?

4. Que se produit-il dans un transformateur quand, après une réparation mal exécutée, l'enroulement primaire compte moins de spires que primitivement?

5. Un petit transformateur, qui sert au brasage des scies, possède 480 spires au primaire avec prises à la 400e spire et à la 320e, et 6 spires au secondaire. La tension d'alimentation est 115 *volts.* Quelles tensions obtient-on au secondaire?

Le courant demande au secteur est 10 *ampères.* Quel est le plus grand courant secondaire?

Réponses : 1,44 *V;* 1,73 *V;* 2,16 *V;* 800 *A.*

6. Pour évaluer le nombre de spires des deux enroulements d'un transformateur 200 — 10 000 *V*, on enroule 20 tours de fil sur l'une des colonnes, on alimente le transformateur sous 115 *V* et l'on mesure la tension entre les extrémités des 20 spires. On trouve 35,7 *V.*

Quel est le nombre de spires de la BT et celui de la HT?

Réponses : 65 et 3 250.

Transformateurs triphasés. Autotransformateurs.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Une carcasse de transformateur monophasé démontable.
Une carcasse de transformateur triphasé démontable.
Un jeu de bobines.
Un rhéostat de charge pouvant absorber 16 ampères *sous* 30 volts.
Un rhéostat de charge pouvant absorber 6 ampères *sous* 180 volts.
Un ampèremètre 20 ampères.
Un ampèremètre 10 ampères.
Un voltmètre 30 volts.
Un voltmètre 300 volts.

LEÇON

A. — Transformateurs triphasés.

1. On peut transformer des courants triphasés avec trois transformateurs monophasés.

Ces trois transformateurs sont identiques. Chacun d'eux est alimenté avec l'un des courants triphasés qu'il s'agit de transformer. Les trois primaires sont couplés soit en étoile, soit en triangle. Il en est de même des secondaires (fig. 1).

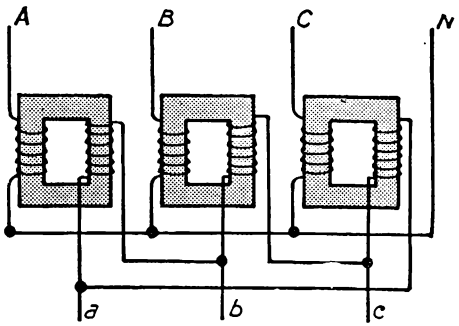
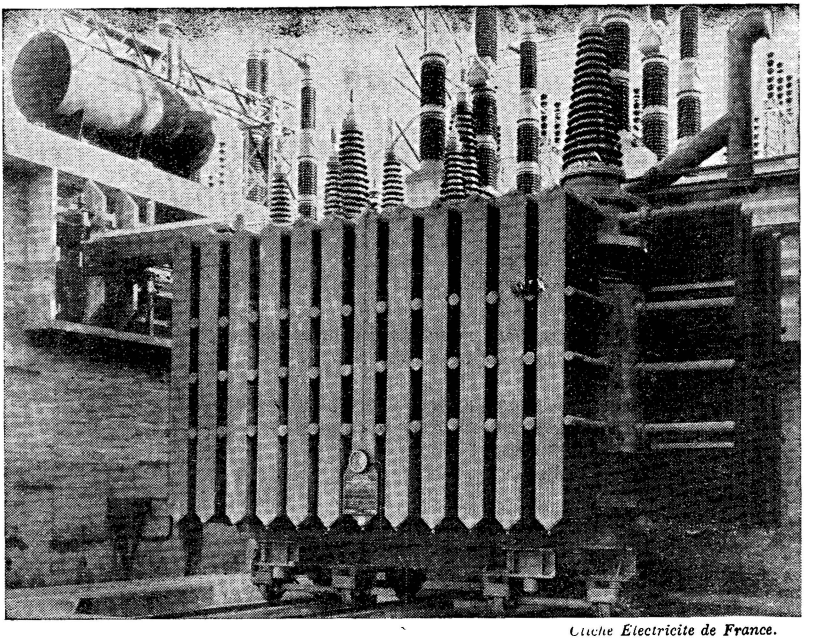


FIG. 1. — Couplage de trois transformateurs monophasés pour équiper une distribution triphasée. Les bornes ABCN sont les bornes HT; les bornes *a*, *b*, *c*, les bornes BT. Comment sont couplés les enroulements HT? les enroulements BT?

Cet emploi de trois transformateurs distincts dans une sous-station de transforma-



Cliché *Electricité de France.*

FIG. 2. — Vue d'un **transformateur triphasé** du poste de transformation Gatellier à St-Etienne-Cantalès (Cantal).

Le transformateur a une puissance de 60 000 kVA ; HT : 220 000 V, étoile, neutre à la terre ; BT : 90 000 V, étoile, neutre à la terre. Il est long de 10 *m*, large de 6,20 *m*, haut de 8,20 *m* et pèse au total 213 *tonnes*, dont 63 d'huile.

Pour assurer son refroidissement, il est plongé dans une cuve munie d'expansions à ailettes qui sont des radiateurs. Un *conservateur* d'huile, visible en haut de la figure à gauche, maintient la cuve pleine d'huile. Des ventilateurs placés derrière l'appareil et que la figure ne montre pas, produisent un courant d'air qui dissipe la chaleur produite.

Le transformateur a été construit par la Société Alsthom.

tion d'un transport d'énergie électrique à haute tension complique l'installation et la rend plus coûteuse.

Plus souvent, en France du moins, on préfère réunir les trois transformateurs en un seul appareil que l'on nomme **transformateur triphasé.**

2. Description d'un transformateur triphasé.

La carcasse magnétique se compose de trois noyaux feuilletés, placés dans le même plan et réunis par des traverses également feuilletées (fig. 3).

Noyaux et traverses sont parfois construits séparément et assemblés par des tirants. Cette disposition facilite le démontage en cas de réparation aux enroulements.

Ou bien les tôles sont empilées une à une (fig. 4) pour obtenir des *joints enchevêtrés.*

Sur chaque noyau sont enfilés un enroulement BT et un enroulement HT. Les trois enroulements BT sont identiques et aussi les trois enroulements HT.

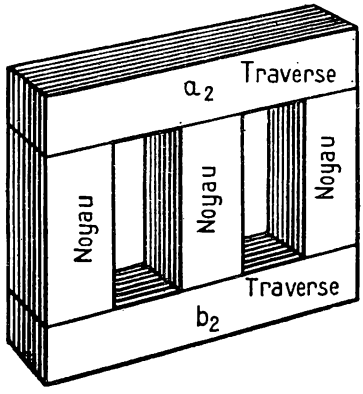


FIG. 3. — **Carcasse magnétique** d'un transformateur triphasé.

3. Fonctionnement d'un transformateur triphasé.

Nous supposons les trois phases *équilibrées.*

Les trois courants primaires égaux produisent dans les trois noyaux trois flux alternatifs ayant la même valeur maximum Φ_m et déphasés l'un par rapport aux autres de un tiers de période. Ces trois flux se composent dans les traverses et leur résultante est nulle dans les régions a_2 et b_2 du circuit magnétique (fig. 3).

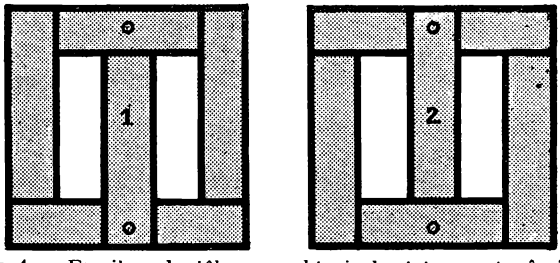


FIG. 4. — Empilage des tôles pour obtenir des **joints enchevêtrés.**
1, couches impaires, 2, couches paires.

En réalité, les circuits magnétiques des noyaux extrêmes sont identiques, mais celui du noyau du milieu est un peu différent. Cette différence est pratiquement négligeable.

Les flux alternatifs induisent dans les trois enroulements HT des f. é. m. égales et triphasées.

En somme, les trois noyaux avec leurs enroulements fonctionnent

comme des transformateurs monophasés pour lesquels valent les deux relations fondamentales :

$$\frac{n_1}{n} = \frac{V_1}{V_2}, \qquad n_1 I_1 = n_2 I_2.$$

Les trois tensions primaires V_1 et les trois tensions secondaires V peuvent être considérées comme des *tensions simples.*

4. Connexions des trois enroulements primaires entre eux et des trois secondaires entre eux.

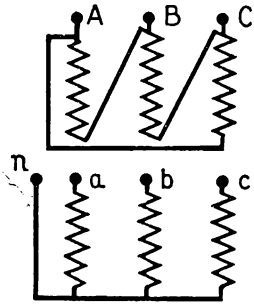


FIG. 5. — **Couplage triangle-étoile** d'un transformateur triphasé.

Certains transformateurs triphasés ont leurs trois enroulements primaires connectés en étoile, d'autres en triangle. De même les enroulements secondaires sont couplés soit en triangle, soit en étoile avec neutre sorti ou non.

Il existe donc des transformateurs *étoile-étoile, étoile-triangle, triangle-étoile, triangle-triangle* (fig. 5).

Les enroulements d'un transformateur sont calculés et construits pour une certaine intensité et une valeur déterminée de la tension entre leurs extrémités. Leur mode de couplage est fixé par le constructeur pour que l'appareil fonctionne convenablement [1].

La tension primaire entre phases U_1 est celle du secteur d'alimentation, la tension secondaire entre phases U_2 dépend du rapport de transformation et des modes de couplage au primaire et au secondaire.

Quels que soient ces modes de couplage, la puissance absorbée par le transformateur est

$$P_1 = U_1 I_1 \sqrt{3} \cos \varphi$$

et la puissance restituée :

$$P_2 = U_2 I_2 \sqrt{3} \cos \varphi'$$

---

1. Si le couplage du primaire est prévu en étoile par le constructeur, il ne faut pas y substituer un couplage triangle. Par exemple, les bobines de 360 spires du transformateur démontable sont construites pour fonctionner sous 115 *volts*. Couplées en étoile, elles constituent un primaire à alimenter par le secteur dont les tensions composées sont 200 *volts*. L'induction maximum dans le circuit magnétique est alors environ 1,05 *teslas*.

Si on couplait les bobines en triangle, chacune d'elles serait alimentée sous 200 *volts*. L'induction maximum dans les noyaux dépasserait 1,8 *teslas*, le courant magnétisant serait 25 fois plus grand, d'où échauffement rapide et excessif.

Un primaire construit pour être couplé en triangle peut être connecté en étoile sans autre inconvénient qu'une diminution de la puissance du transformateur.

Signalons un autre mode de couplage employé quand le secondaire alimente une installation souvent déséquilibrée : c'est **le couplage en zigzag** (fig. 6).

Chaque phase secondaire comprend deux demi-bobines placées sur deux noyaux différents et réunies en série en sens inverse. Les trois phases sont en étoile.

Cette disposition, par laquelle chaque phase intéresse deux noyaux à la fois, empêche le déséquilibre éventuel du secondaire de se communiquer au primaire.

Elle présente l'inconvénient de mettre en série, dans chaque branche de l'étoile, les tensions dans les deux demi-bobines qui sont déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre. Pour obtenir la même tension qu'avec le couplage en étoile normal, il faut au secondaire $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}16$ fois plus de spires.

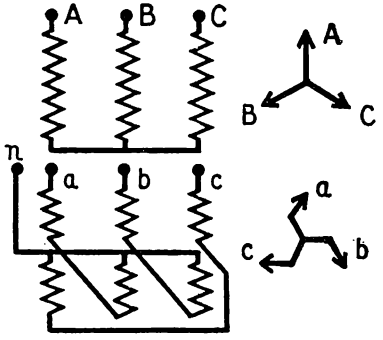


FIG. 6. **Couplage en zigzag** du secondaire d'un transformateur. Le primaire est en étoile.

Pour corriger la chute de tension d'un transformateur triphasé en charge, la HT couplée en étoile comporte parfois quelques spires de réglage sur chaque phase, au voisinage du point neutre, que l'on peut ajouter ou retrancher à l'enroulement à l'aide d'un commutateur approprié. On modifie ainsi le rapport de transformation.

4. Rendement d'un transformateur.

Le rendement est le rapport de la puissance restituée par le transformateur à la puissance qui lui est fournie, c'est-à-dire de la *puissance secondaire* à la *puissance primaire.*

$$\eta = P_2 : P_1.$$

Il est possible de le déterminer en mesurant les deux puissances avec des wattmètres.

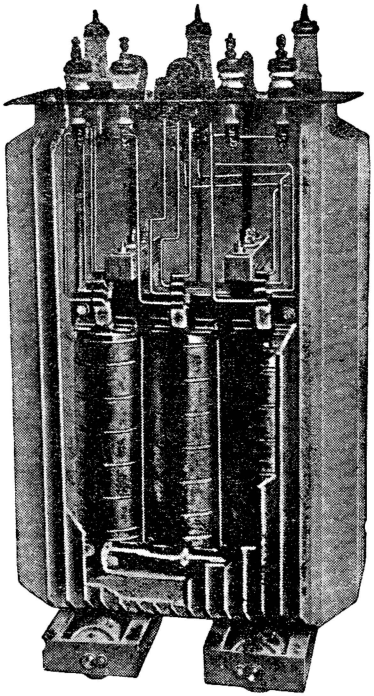
On obtient plus de précision en employant la *méthode des pertes séparées* dont nous avons indiqué le principe dans la 30e leçon.

Les pertes dans un transformateur sont :

1° Les pertes dans le fer par hystérésis et courants de Foucault; elles ne varient pas avec la charge et dépendent seulement de la tension; on les mesure avec un wattmètre en alimentant le transformateur à vide à la tension primaire normale;

2° Les pertes Joule dans le cuivre, proportionnelles au carré des intensités; on les calcule facilement.

Le rendement des transformateurs à pleine charge est excellent ; il atteint 0,98 pour les gros, un peu moins pour les petits. Il reste bon depuis la moitié jusqu'aux cinq quarts de la charge normale.



Cliché Cie Gle Electrique, Nancy

FIG. 7 et 8. — **Transformateur triphasé de moyenne puissance** visible dans sa cuve à huile dont la paroi antérieure est coupée.
Remarquer les trois bornes HT, les quatre bornes BT et un *commutateur de prise* sur la BT pour faire varier de 4 à 5 % le rapport de transformation.
Puissance : 125 *kVA*, tensions : 15 000 *V* — 230 *V*; neutre BT sorti.

Remarquons que la *puissance réelle* d'un transformateur en charge dépend du facteur de puissance de l'installation dans laquelle débite le secondaire; aussi la puissance nominale d'un transformateur s'indique-t-elle par sa *puissance apparente*, exprimée en *kilovolts-ampères*.

6. Refroidissement d'un transformateur.

La puissance perdue dans un transformateur se transforme en chaleur qu'il faut évacuer.

Pour les transformateurs de faible puissance, le refroidissement naturel dans l'air est suffisant.

Les transformateurs un peu plus importants sont refroidis par air soufflé.

Le mode de refroidissement le plus utilisé consiste à plonger le transformateur dans une cuve en tôle ondulée pleine d'huile minérale ou de *pyranol* (dérivé chloré du benzène qui a l'avantage de ne pas être inflammable).

L'huile est parfois refroidie par circulation d'eau (fig. 7 et 8).

B. — Autotransformateurs.

7. Construisons et étudions un autotransformateur.

Enfilons quatre bobines sur la carcasse du transformateur monophasé démontable (fig. 9), deux, AB et BC, de chacune 180 spires et deux, CD et DE, de chacune 90 spires. Connectons-les en série.

Réunissons les bornes B et E au secteur à 115 *volts* un ampèremètre et un voltmètre dans le circuit.

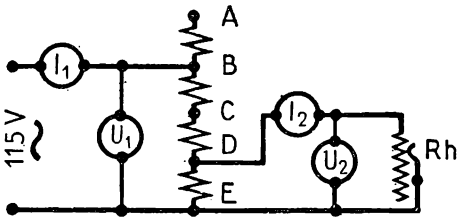


FIG. 9. — Schéma de l'enroulement d'un **autotransformateur** monté en **abaisseur de tension.** (La bobine AB ne joue ici aucun rôle.)

1° Entre les bornes D et E, montons un rhéostat de charge avec ampèremètre et voltmètre.

A vide, la tension U_1 entre les bornes B et E est 115 *volts*, la tension U_2 est 28 *volts* entre les bornes D et E.

En charge, faisons débiter dans le rhéostat un courant $I_2 = 16$ *ampères*, le courant pris au secteur est $I_1 = 4{,}2$ *ampères*.

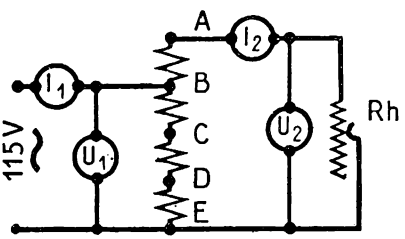


FIG. 10. — L'autotransformateur fonctionne en **élévateur de tension.**

2° Montons le rhéostat de charge avec un ampèremètre et un voltmètre entre les bornes A et E (fig. 10).

A vide, la tension entre A et E est 172 *volts*.

En charge, pour un courant $I_2 = 6$ *ampères*, le secteur fournit à peu près $I_1 = 8$ *ampères*.

8. Théorie sommaire de l'autotransformateur.

Le montage de la figure 9 ressemble à celui d'un rhéostat potentiométrique pour courant continu. Mais, à la différence d'un potentiomètre, le transformateur peut fournir un courant d'intensité supérieure à celle prise au secteur.

Avec le montage de la figure 10, la tension obtenue aux bornes du circuit d'utilisation est supérieure à celle du secteur, résultat que l'on n'obtient pas avec un potentiomètre.

L'appareil que nous avons monté est un *transformateur*, différant des transformateurs précédemment étudiés parce qu'il ne possède qu'un enroulement dont une partie est commune au *primaire* et au *secondaire*. On le nomme un **autotransformateur.**

Dans la partie de l'enroulement commune au primaire et au secondaire, le courant est la somme géométrique des courants primaire et secondaire.

Les deux relations

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad \text{et} \quad n_1 I_1 = n_2 I_2$$

conviennent à un autotransformateur comme à un transformateur normal.

On construit des *autotransformateurs monophasés* et des *autotransformateurs triphasés*.

9. Emploi des autotransformateurs.

A puissance égale, les autotransformateurs sont plus petits que les transformateurs normaux; ils n'ont qu'un enroulement, aussi coûtent-ils moins que des transformateurs.

Ils ont le défaut de ne pas séparer *électriquement* la HT et la BT. C'est pourquoi leur usage est proscrit dans bien des cas, par exemple pour alimenter des lampes de sécurité à 24 *volts* ou des sonneries d'appartement.

Ils servent d'intermédiaires pour brancher des récepteurs d'une tension déterminée sur des secteurs de tension différente.

C. — Conclusion.

Les transformateurs ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Ils permettent tous les changements utiles de tension sans grandes pertes. Ils sont de construction facile, sans organes tournants. Ils sont robustes et fonctionnent sans surveillance.

Leurs emplois sont nombreux. De tout petits, d'une dizaine de volts-ampères, monophasés, alimentent les sonneries d'appartement sous tension de 6 ou 8 *volts*. D'énormes, pesant plus de 200 tonnes, d'une puissance de 70 000 *kilovolts-ampères*, dont la HT atteint 220 000 *volts*, équipent des Centrales et des sous-stations électriques.

RÉSUMÉ

1. — Un transformateur triphasé réunit trois transformateurs monophasés sur la même carcasse magnétique.
Les trois enroulements primaires sont couplés en étoile ou en triangle. Les secondaires sont connectés en étoile, en triangle ou en zigzag.

2. — Pour une tension déterminée U_1 entre phases primaires, la tension secondaire U_2 dépend du rapport des nombres de spires des deux enroulements sur chaque noyau et des modes de couplage.

3. — Le rendement des transformateurs est élevé. Les transformateurs de moyenne et de grande puissance sont plongés dans des cuves pleines d'huile pour faciliter leur refroidissement.

4. — Les autotransformateurs monophasés n'ont qu'un enroulement dont une partie est commune au primaire et au secondaire. On fabrique aussi des autotransformateurs triphasés.

EXERCICES

1. Le primaire HT d'un transformateur triphasé comprend 3 000 spires par noyau, les trois colonnes sont connectées en triangle.
La BT possède 35 spires par noyau avec couplage en étoile, neutre sorti.
Le transformateur est alimenté sous 10 000 *volts* entre phases. Calculer la tension simple et la tension composée obtenues au secondaire.

Réponses : 117 *V;* 203 *V.*

2. Un transformateur triphasé 70 000/15 000 V débite 2 000 kVA à pleine charge sous 15 000 V dans un réseau dont le $\cos\varphi$ est 0,80. Quel courant fournit-il? Quelle puissance active débite-t-il?
Le rendement de l'appareil est alors 0,98. Quelle est la puissance active absorbée au primaire?
Quel est le courant primaire, le facteur de puissance étant 0,78?

Réponses : 77 *A* — 1 600 *kW* — 1 630 *kW* — 17,3 *A.*

3. La puissance d'un transformateur triphasé est 70 000 k*VA*. Quand l'appareil débite à pleine charge dans un réseau dont le $\cos\varphi$ est 0,80, il a un rendement de 0,983.
Quelle est alors la puissance perdue en chaleur?
Quelle est la quantité de chaleur exprimée en *kilocalories* produite à l'heure? On rappelle que 1 kWh équivaut à 860 *kilocalories.*
Combien faut-il de mètres cubes d'eau pour enlever cette chaleur sachant que la température de l'eau augmente de 30° dans le réfrigérateur d'huile?

Réponses : 968 *kW* — 832 000 *kilocalories* — 27,7 m^3.

4. Un transformateur 220-110 *V peut-il être employé pour* 440-220 *V?*
Le flux devrait être doublé. L'induction est habituellement de 0,8 à 1,4 *teslas.* Pour

la doubler, il faut beaucoup plus que doubler le courant magnétisant, donc fort courant à vide et pertes dans le fer élevées. L'emploi sous 440 V n'est possible que pendant peu de minutes.

5. Un transformateur calculé pour 50 p : s *peut-il être employé pour* 25 p : s?
Le flux doit être doublé. Même conclusion que ci-dessus.

6. Quelle est l'influence d'un entrefer dans le circuit magnétique d'un tranformateur?
Le courant magnétisant est augmenté. Le courant à vide est plus grand et aussi le courant en charge. Les pertes Joule étant accrues, il faut faire fonctionner le transformateur à charge réduite pour éviter un échauffement excessif. Le déphasage du courant primaire sur la tension primaire est grand.

7. Que se produit-il si, à la suite d'une réparation mal exécutée, l'enroulement primaire d'un transformateur compte moins de spires que primitivement?
Le flux est augmenté pour fournir une f. c. é. m. plus grande par spire primaire. Le courant primaire est donc plus grand ainsi que les pertes dans le fer. La tension secondaire croît.

RENSEIGNEMENTS SUR LES APPAREILS UTILISÉS

Un transformateur monophasé et un transformateur triphasé, tous deux démontables, sont indispensables dans le matériel d'enseignement de l'électricité. Dans plusieurs leçons, ils sont

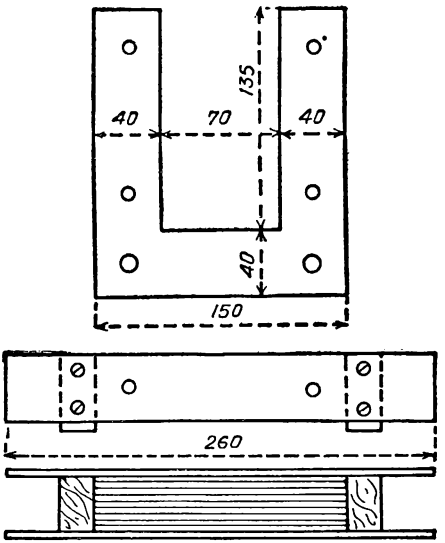


FIG. 11. — **Tôles et traverse démontable** pour transformateur monophasé.

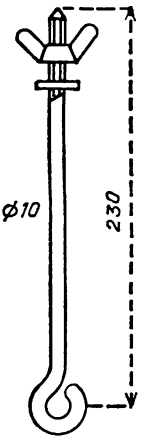


FIG. 12. — **Boulon de blocage** de la traverse amovible.

employés montés; dans d'autres, on utilise certaines de leurs pièces constitutives pour réaliser quelques expériences.

On fabrique leurs carcasses magnétiques avec des tôles pour transformateurs ou dynamos de 0,5 *mm*, si l'on peut s'en procurer. A défaut, on emploiera des tôles minces noires de ferblantier que l'on isolera, après découpage, d'une couche de vernis très légère.

Transformateur monophasé. — La carcasse a une section de 40 × 40 *mm*. Elle se compose d'environ 80 tôles découpées aux dimensions de la figure 11. Bien

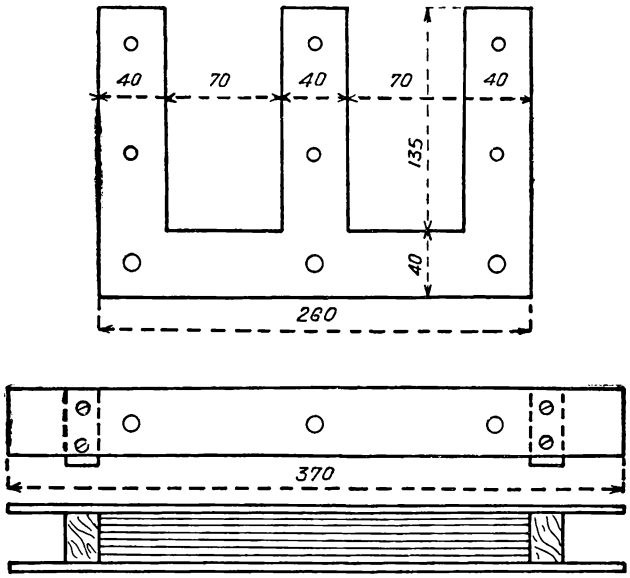


FIG. 13. — **Tôles et traverse démontable** pour transformateur triphasé.

que le découpage en soit plus long et cause quelques pertes de matière, la forme de la figure est recommandée pour le corps de la carcasse, on supprime ainsi deux joints et le transformateur obtenu est plus robuste et indéformable. Les deux joints magnétiques inévitables entre les noyaux et la traverse supérieure devront être dressés avec soin. Les tôles seront tracées par paire, tête-bêche.

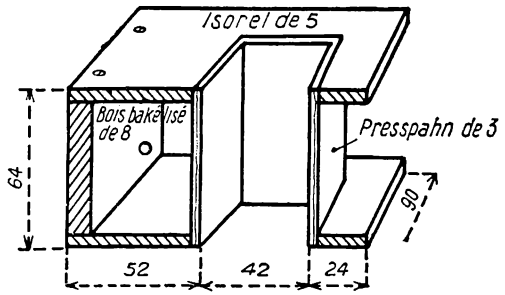
Deux tôles de 3 *mm* constituent les joues de la traverse supérieure. Elles servent à bloquer la traverse sur la carcasse à l'aide de deux longs boulons avec des écrous à oreilles (fig. 12).

Les rivets d'assemblage des tôles sont légèrement isolés au papier.

Transformateur triphasé. — La carcasse a aussi une section de 40 × 40 *mm*. Elle est construite comme la précédente (fig. 13).

Bobines. — C'est la partie coûteuse des appareils, parce que chacune porte un poids assez élevé de cuivre.

Elles servent indifféremment pour l'un et l'autre transformateur. La carcasse en est robuste avec des joues en isorel dur et une plaque de bornes en bois bakélisée (fig. 14).



FIG, 14. — **Carcasse de bobine** représentée en coupe.

Le fil de cuivre employé est émaillé et recouvert d'une couche de coton. Pour les tensions de 1.000 et 2.000 volts, si l'on ne peut se procurer de fil spécial isolé au papier, on séparera les couches successives par une feuille de papier fin. L'enroulement de la bobine de 9 spires est fait d'une bande de cuivre rouge large de 50 *mm*, épaisse de 1 *mm;* les spires sont séparées par une bande de presspahn.

La série de bobines est ainsi composée :

Nombre de bobines	Tension par bobine	Intensité	Diamètre du fil	SPIRES			Longueur du fil	Poids	Résistance
				Nombre total	Spires par couche	Nombre de couches			
	V	*A*	*mm*				*m*	*g*	Ω
3	115	5	12/10	360	36	10	100	1 000	1,5
3	60	10	20/10	180	22,5	8	50	1 400	0,28
2	30	20	20/10 2 en parall.	90	11	8	55	1500	0,08
3	3	200	50×1	9	1	9	2,40	1100	0,001
2	1000	0,4	4/10	3600	97	38	993	1100	137
1	2000	0,2	25/100	7200	135	54	2014	880	710

Emploi du matériel. — Le primaire du *transformateur monophasé*, pour être branché sur le secteur à 115 *volts*, doit posséder environ 360 spires. L'induction maximum dans le circuit magnétique est alors voisine de 1,05 *teslas*.

De même le primaire du *transformateur triphasé*, pour être alimenté avec les 200 *volts* entre phases du secteur, sera fait de trois bobines de 360 spires connectées *en étoile*.

La puissance nominale du transformateur monophasé est 600 *volts-ampères*, celle du transformateur triphasé 1 000 *volts-ampères*. Pour des expériences brèves, ils peuvent fournir beaucoup plus.

La carcasse à trois noyaux sert aussi à monter un transformateur monophasé,

il suffit d'enfiler sur le seul noyau du milieu une bobine primaire de 360 spires et une bobine secondaire.

Avec les deux transformateurs monophasés équipés pour 115-2 000 *volts*, il sera possible de réaliser un transport d'énergie électrique de démonstration. *Des précautions seront nécessaires avec les tensions de* 1 000 *et* 2 000 volts *qui sont dangereuses.*

La carcasse à deux noyaux, avec des bobines convenables, permet de monter soit une bobine de self, soit un auto-transformateur.

Le transformateur monophasé sert dans les ateliers à la gravure électrique sur les pièces d'acier, même trempées, au chauffage par arc des fers à souder, etc.

PROBLÈMES D'EXAMENS

1. Un industriel se propose de fabriquer des petits creusets électriques pour fondre des alliages légers. Ces appareils pourront être utilisés indifféremment sous 115 ou 230 V. Leur équipement électrique sera composé de deux résistances R_1 et R_2; la résistance R_1 sera employée seule si la tension est 115 V; les deux résistances R_1 et R_2 seront utilisées en série dans le cas de 230 V. Les creusets doivent porter à la température de coulée 900 *g* d'alliage d'aluminium en 5 *minutes.*

Sachant que pour échauffer, fondre et amener à la température de coulée 1 *g* de l'alliage considéré, il faut 120 *calories,*

1° calculer la puissance en *watts* d'un creuset,

2° calculer les valeurs des résistances R_1 et R_2.

3° On utilise, pour fabriquer les résistances, du fil RNC dont la résistivité, à la température d'utilisation, est 1,20 $\Omega/m/mm^2$, dans lequel on admet une densité de courant de 20 A/mm^2. Calculer les sections, diamètres et longueurs des fils à employer.

Réponses : 1,5 kW; — 8,8 Ω; 26,5 Ω; — 0,65 mm^2; 0,90 *mm;* 4,77 *m;* — 0,325 mm^2; 0,64 *mm;* 7,18 *m.*

2. Un transformateur triphasé, primaire couplé en triangle, secondaire en étoile, est alimenté au primaire sous une tension de 3 000 V. Une phase primaire compte 3 000 spires et chaque phase du secondaire a 220 spires. La chute de tension est 2 % quand le secondaire alimente :

a) 90 lampes absorbant chacune 75 W, branchées entre fils de ligne et neutre;

b) 4 moteurs triphasés fournissant chacun 5 *ch* à pleine charge avec un rendement de 0,85 et un facteur de puissance de 0,80.

1° Faire le schéma du montage du transformateur avec 3 lampes et 1 moteur.

2° Calculer :

a) la tension d'alimentation d'une lampe (négliger la chute de tension en ligne);

b) la puissance totale des récepteurs;

c) la puissance réactive des moteurs;

d) la puissance apparente des récepteurs;

e) l'intensité du courant dans chaque phase du secondaire du transformateur.

Réponses : 220 V; — 24 000 W; — 13 000 VAr; — 27 300 VA; — 73,2 A.

(*B. E. I., Paris,* 1947.)

Transport et distribution de l'énergie électrique.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un transformateur démontable monophasé; primaire : *deux bobines de* 180 *spires en série ;* secondaire : *deux bobines de* 3 600 *spires en série.*

Un transformateur démontable à trois colonnes équipé en monophasé; placer sur le noyau du milieu : primaire, *une bobine de* 7 200 *spires,* secondaire : *une bobine de* 360 *spires.*

Un voltmètre de 150 volts.

Deux lampes de 100 watts, 115 volts, *en parallèle.*

Un interrupteur bipolaire.

Deux fils RNC, diamètre 0,5 millimètre, *longueur* 2 mètres.

N. B. — La tension de 2 000 volts *est dangereuse. On débranchera l'alimentation à* 115 volts *aussitôt que l'expérience sera terminée.*

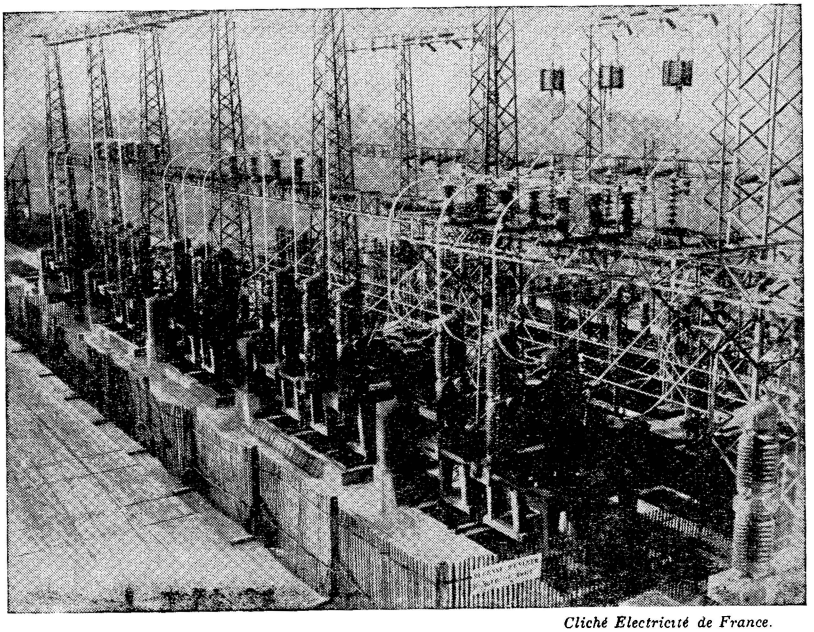
LEÇON

1. L'énergie électrique est souvent utilisée loin des Centrales où elle est produite.

En France, les Centrales thermiques d'énergie électrique sont surtout installées dans le Nord au voisinage des mines de charbon et dans l'Est, à proximité des usines métallurgiques qui leur fournissent du gaz de hauts fourneaux. La plupart des Centrales hydrauliques sont construites dans le Massif Central, les Alpes et les Pyrénées.

Ce sont les grandes villes et leurs banlieues industrielles, très peuplées, qui consomment le plus d'énergie électrique.

Le transport de l'énergie électrique des lieux de production aux régions d'utilisation s'effectue par de longues lignes aériennes parcourues par des courants triphasés.



Cliché Electricité de France.

FIG. 4.
Vue d'une partie du **Poste de transformation** Gatelier à St-Etienne-Cantalès (Cantal).
Le poste est installé en plein air. La partie représentée est réservée aux disjoncteurs à 90 000 *volts*. Au premier plan, on voit cinq groupes de trois disjoncteurs. Les appareils de ce modèle, nommés *orthojecteurs* et construits par les Ateliers de Delle, ne renferment qu'un petit volume d'huile. Leur pouvoir de coupure est considérable : ils peuvent couper sans se détériorer une puissance de court-circuit de un million et demi de kVA.

2. Montons une installation de transport d'énergie électrique de démonstration.

Constituons une ligne avec deux fils d'alliage RNC longs de 2 *mètres*, ayant 0,5 *millimètre* de diamètre. Sa résistance, qui est 21 *ohms*, est égale à celle d'une ligne de 33 *kilomètres* faite de deux câbles en cuivre de 8 *millimètres* de diamètre.

a) Alimentons par cette ligne, avec la tension à 115 *volts* du secteur, deux lampes de 100 *watts* montées en parallèle. Un voltmètre est en dérivation sur ces lampes (fig. 1).

Les lampes éclairent peu, leurs filaments sont seulement rouges et non incandescents. La tension à leurs bornes n'est que 79 *volts*.

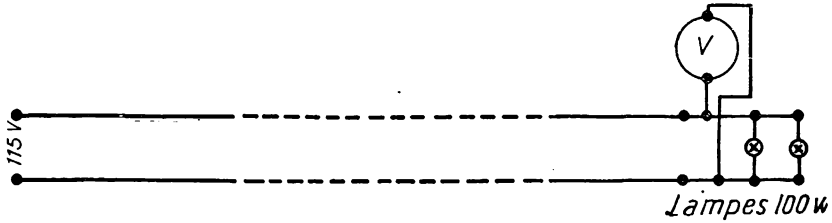


FIG. 1. — **Transport d'énergie** de démonstration; tension 115 *volts*.

La chute de tension dans la ligne est 36 *volts*, soit 31 %.

b) Plaçons au départ de la ligne un transformateur élévateur de tension (transformateur monophasé démontable avec 360 spires au primaire et 7 200 au secondaire). Branchons la HT sur la ligne RNC. Les deux extrémités de la ligne aboutissent à la HT d'un

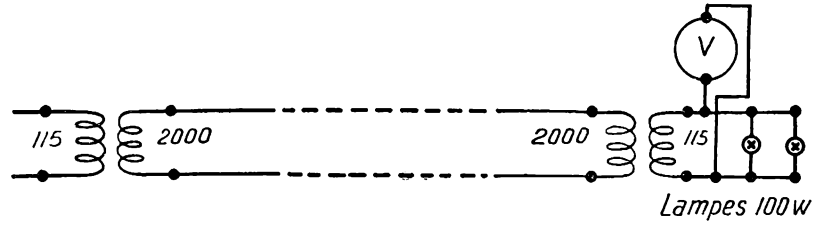


FIG. 2. — **Transport d'énergie** de démonstration; tension 2 000 *volts*.

second transformateur de même rapport de transformation (transformateur à trois colonnes démontable, primaire : 7 200 spires, secondaire : 360 spires). Le secondaire débite dans les deux lampes de 100 *watts* de l'expérience précédente (fig. 2).

Ces lampes brillent presque normalement. La tension entre leurs bornes est 107 *volts*. La chute de tension à partir du secteur est 8 *volts*, soit 7 %.

Comparons ces deux modes de transport de la même puissance, 200 *watts*.

En utilisant seulement la tension de 115 *volts*, l'intensité dans la ligne est 1,7 *ampère*. Elle est relativement grande et cause la chute de tension excessive. Le mode de transport est défectueux.

Dans la seconde expérience, la tension employée dans la ligne est environ 2 000 *volts* et l'intensité réduite à 0,085 *ampère.*

Bien que la résistance des enroulements HT des deux transformateurs s'ajoute à celle de la ligne, la chute de tension est inférieure au quart de sa valeur dans la première expérience.

Nous avons constaté expérimentalement l'avantage de l'emploi d'une tension élevée entre les fils de transport.

Deux calculs simples vont nous montrer que le recours à une tension élevée s'impose pour que l'établissement d'une ligne de transport d'énergie électrique soit possible.

3. Calcul du diamètre d'une ligne de transport d'énergie électrique.

Soit à transporter en courant monophasé une puissance de 50 kilowatts *à une distance de* 20 kilomètres *sans que la chute de tension (et par conséquent la perte de puissance) dépasse* 10 %. *Proposons-nous de déterminer le diamètre du conducteur en cuivre de la ligne bifilaire à employer.*

Nous tiendrons compte seulement de la résistance de la ligne en négligeant sa self-induction et sa capacité.

a) ***Transport sous 500 volts au départ.*** — La chute de tension dans la ligne ne doit pas dépasser :

$$500 \times 0{,}10 = 50 \text{ } volts.$$

Le courant dans la ligne sera :

$$50\,000 : 500 = 100 \text{ } ampères.$$

La résistance de la ligne restera inférieure à :

$$50 : 100 = 0{,}5 \text{ } ohm.$$

Un fil de cuivre ayant 1 *mètre* de longueur et 1 *millimètre carré* de section a une résistance de 0,017 24 *ohm* et pèse 8,89 *grammes.* Vous calculerez facilement qu'une ligne longue de 40 000 *mètres* doit avoir une section de 1 379 *millimètres carrés* pour que sa résistance soit 0,5 *ohm.* Son diamètre serait 41,9 *millimètres,* elle pèserait 490 *tonnes.* Son prix serait hors de proportion avec la puissance à transporter.

b) ***Transport sous 7 500 volts.*** — Le courant dans la ligne sera :

$$50\,000 : 7\,500 = 6{,}6 \text{ } ampères.$$

La chute de tension admissible :

$$7\,500 \times 0{,}10 = 750 \text{ } volts$$

correspond à une résistance de la ligne de

$$750 : 6{,}6 = 112{,}5 \text{ } ohms.$$

Cette résistance est 225 fois plus grande que celle que nous avons trouvée pour la ligne à 500 *volts*, la section de la ligne sera 225 fois plus petite, soit

$$1\,379 : 225 = 6{,}13 \text{ } \textit{millimètres carrés.}$$

On emploiera un fil de 3 *millimètres* de diamètre, minimum autorisé par les règlements. Sa section est 7,07 *millimètres carrés*, sa résistance 2,255 *ohms par kilomètre*. La ligne aura une résistance de 90 *ohms*, il s'y produira une chute de tension de

$$90 \times 6{,}6 = 600 \text{ } \textit{volts}, \text{ soit de } 8\ \%,$$

elle pèsera 2 520 *kilogrammes*.

La solution est acceptable.

4. Les tensions de transport de l'énergie électrique sont normalisées.

Les lignes de transport d'énergie électrique sont parcourues par des courants triphasés.

Vous venez de voir que l'emploi de hautes tensions de transport est nécessaire. Mais cet emploi ne présente pas que des avantages : l'isolation est plus difficile à réaliser, l'appareillage de manœuvre et de sécurité est beaucoup plus coûteux ainsi que la construction des lignes.

Il faut dans chaque cas obtenir le transport au moindre prix et la tension est choisie en tenant compte de l'importance de la puissance à transporter et de la distance à parcourir.

On utilise des lignes à 220 000 *volts* (220 kV) pour transporter 140 000 *kilowatts* à 500 *kilomètres*, ce sont des lignes *nationales*.

Des lignes *régionales* à 60 000 *volts* répartissent cette puissance dans un rayon de 150 *kilomètres*.

Elles sont continuées par des lignes *locales* à 15 000 *volts* qui, jusqu'à une distance de 35 *kilomètres*, distribuent l'énergie à haute tension aux gros consommateurs et alimentent les cabines de transformation à basse tension.

Des lignes fonctionnent encore à 150, 90, 10 et 5,5 *kilovolts;* elles sont de construction ancienne.

5. Centrales électriques.

Les 30 milliards de kilowattsheures consommés en France en 1948 ont été fournis en quantités à peu près égales par les Centrales hydrauliques et par les Centrales thermiques.

On espère produire bientôt 39 milliards de *kWh*, dont 24 proviendront des Centrales hydrauliques et 15 des Centrales thermiques.

Centrales hydrauliques. — Elles sont de l'un des types suivants :

1° *Usines de haute chute.* Par exemple, celle du Portillon utilise, avec une hauteur de chute de 1 400 *mètres*, l'eau de deux lacs pyrénéens.

2° *Usines de moyenne chute.* Ce sont les plus nombreuses. Le type en est celle de Génissiat sur le Rhône, où l'eau descend d'une soixantaine de mètres.

3° *Usines de basse chute* comme celle de Kembs sur le Rhin qui utilise une dénivellation d'une quinzaine de mètres due à un barrage en travers du fleuve.

Dans les Centrales hydrauliques, l'énergie prise à l'eau ne coûte rien, mais les frais de première installation sont énormes. C'est l'intérêt et l'amortissement du capital investi qui déterminent surtout le prix du kilowattheure.

Ces Centrales ont le grave défaut de produire peu d'énergie pendant deux ou trois mois de l'année à cause du manque d'eau. Des Centrales thermiques sont indispensables pour servir d'appoint.

Centrales thermiques. — Depuis quelques années, les chaudières à vapeur et les turbo-alternateurs ont été très perfectionnés.

Les chaudières modernes produisent de la vapeur, à la pression de 40 à 80 *kilogrammes par centimètre carré*, que l'on surchauffe jusqu'à 500°. On fabrique des turbo-alternateurs de grande puissance (60 000 *kW*) dont le rendement est excellent.

Pour obtenir 1 *kilowattheure*, il suffit de 500 *grammes* de charbon de mauvaise qualité, pulvérisé.

Interconnexion des Centrales. — Toutes les lignes de transport et de répartition de l'énergie sont reliées les unes aux autres dans les postes de transformation. Elles forment un réseau unique, dans lequel débitent en parallèle tous les alternateurs de toutes les Centrales hydrauliques et thermiques françaises. On dit que les Centrales sont **interconnectées.**

Cette interconnexion permet :

de charger au maximum, à chaque instant, les Centrales les plus économiques et de n'utiliser les autres que dans la mesure où la demande d'énergie l'exige;

d'augmenter la sécurité de fonctionnement en tous les points du réseau en remplaçant en quelques instants par une autre une Centrale accidentellement défaillante.

Toutes les Centrales obéissent à un seul chef, *le répartiteur de charge*, qui reçoit d'heure en heure, et parfois plus fréquemment, des renseignements sur la situation du réseau et prescrit aux usines la puissance qu'elles ont à fournir.

6. Lignes à haute tension.

Les alternateurs des Centrales produisent l'énergie électrique à une tension de 8 000 à 15 000 *volts*. Des transformateurs voisins élèvent cette tension à la valeur choisie pour le transport, par exemple 220 *kV*, et les courants sont envoyés à une ligne triphasée aérienne.

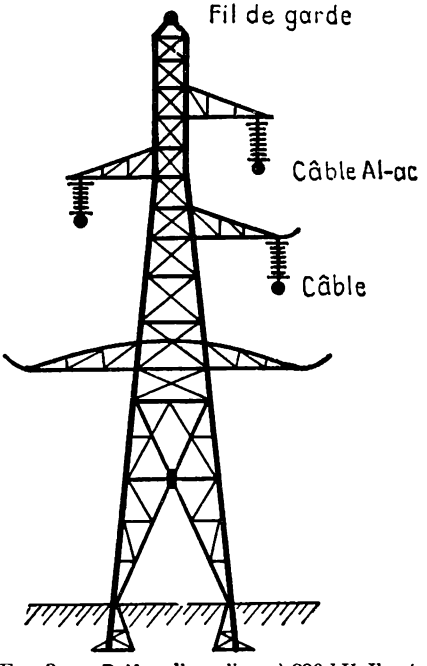


FIG. 3. — **Pylône** d'une ligne à 220 *kV*. Il est haut de 36 *mètres* et pèse 4 *tonnes*.

Cette ligne est faite de trois câbles en aluminium avec âme en acier, suspendus par des chaînes d'isolateurs à de grands pylônes d'acier.

La figure 3 représente l'un de ces pylônes. Vous remarquerez un quatrième câble en acier qui réunit les sommets des pylônes. Ce **fil de garde,** mis à la terre de place en place, protège la ligne de la foudre.

Parfois chaque conducteur de la ligne est dédoublé et les pylônes supportent six fils. Cette disposition réduit la self-induction de la ligne qui augmente la chute de tension.

7. Postes de transformation.

A ces postes aboutissent les lignes à haute tension; en partent des lignes à tension moins élevée sur pylônes moins lourds avec moins d'isolateurs que pour les lignes à 220 *kV*.

La figure 4 de la leçon représente une partie d'un poste de transformation. Il est installé en plein air et occupe une surface de 3 à 4 *hectares*. Outre les transformateurs, il est équipé d'appareils de manœuvre, sectionneurs et disjoncteurs, d'instruments de mesure, d'appareils de

sécurité, bobines de selfs et parafoudres que nous ne décrirons pas (fig. 4).

8. Cabines de transformation.

Ce sont les postes de livraison de l'énergie électrique à basse tension aux usagers, soit à 115/200 *volts* dans les villes, à 230/400 *volts* dans les distributions rurales.

Dans les villes, ces cabines sont souvent enclavées dans des bâtiments publics. Dans les campagnes, quand elles sont peu importantes et de dimensions réduites, on les accroche à bonne hauteur à un poteau.

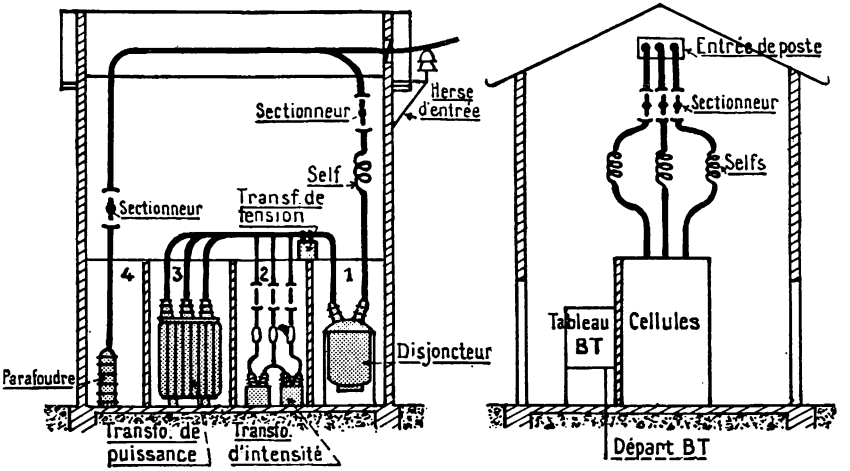


FIG. 5. — **Cabine de transformation.** A gauche, le compartiment HT avec ses quatre cellules de béton contenant l'appareillage.

La figure 5 est la représentation simplifiée d'une cabine de transformation. La cabine est divisée en deux compartiments, l'un réservé à la HT, l'autre à la BT, chacun avec son entrée spéciale.

Les appareils qui équipent le compartiment à haute tension sont indiqués sur la partie gauche de la figure. Dans le compartiment de la basse tension se trouve un tableau avec les interrupteurs commandant les départs, des fusibles, des ampèremètres, un voltmètre avec commutateur et parfois des compteurs.

9. Lignes à basse tension.

a) ***Lignes souterraines.*** — Ce sont les seules qui soient permises dans certains quartiers des villes.

Chaque ligne est constituée par trois câbles en cuivre isolés au papier et protégés par un tube de plomb et une armature de feuillards d'acier (fig. 6).

On connecte bout à bout les tronçons de ce câble armé avec des boîtes de jonction en fonte, dans lesquelles les épissures entre conducteurs sont, après isolement au papier, noyées à chaud dans un composé isolant à base de brai (fig. 7). Le raccordement avec les lignes aériennes, telles que les colonnes montantes des immeubles, s'effectue par des boîtes d'extrémité en fonte où la sortie des conducteurs du câble armé est aussi noyée à chaud dans du compound isolant. Il faut, en effet, empêcher toute entrée d'air humide dans le câble sous plomb pour conserver un bon isolement entre phases.

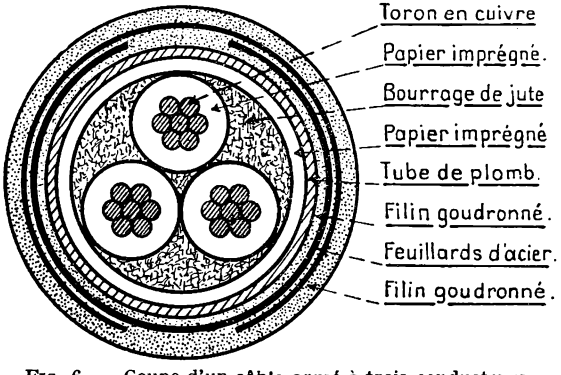


FIG. 6. — Coupe d'un **câble armé** à trois conducteurs.

b) ***Lignes aériennes.*** — Dans les villes, elles sont à quatre fils : trois de phases et un fil neutre placé au-dessus des autres.

Dans les villages, vous remarquerez souvent un cinquième fil sur lequel sont branchées les lampes de l'éclairage public.

Chez les abonnés dont l'installation électrique est peu puissante, pénètre une dérivation à deux fils, l'un venant d'un fil de phase, l'autre du neutre.

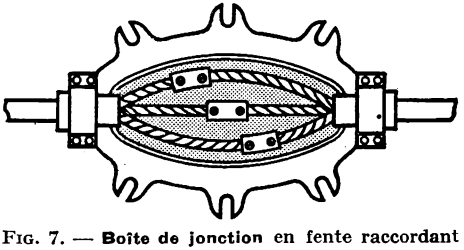


FIG. 7. — **Boîte de jonction** en fente raccordant deux tronçons de câble armé. Le couvercle est enlevé; il se fixe sur la boîte à l'aide de 6 boulons passant dans les encoches visibles sur la figure. La boîte est emplie à chaud de matière isolante à base de brai.

Pour une installation plus importante, avec lampes et moteurs, la dérivation est prise sur les quatre fils.

Trois fils, sans neutre, suffisent pour alimenter seulement des moteurs.

RÉSUMÉ

1. — Pour transporter le l'énergie électrique sans pertes excessives dues à la résistance de la ligne, il faut élever la tension de transport.
Les lignes à très haute tension sont isolées fortement et supportées par des pylônes hauts et lourds.

2. — Les Centrales hydrauliques coûtent très cher à construire. Leur débit est faible à certaines époques de l'année et des Centrales thermiques sont nécessaires pour leur servir d'appoint.
Toutes les Centrales françaises sont interconnectées.

3. — Les courants triphasés fournis par les grandes Centrales électriques subissent, en général, quatre transformations de tension avant d'être utilisés.

EXERCICES

1. Dans un transport d'énergie, le rendement du transformateur 15/220 *kV* de sortie de la Centrale est 0,98, celui du transformateur 220/60 *kV* du premier poste de transformation est 0,97, du transformateur 60/15 *kV*, 0,95 et celui de la cabine de transformation 15 000/115 V, 0,93.

Les pertes dans la ligne à 220 *kV* sont de 5 %, de 6 % dans la ligne à 60 *kV*, de 4 % dans la ligne à 15 *kV*.

Sur 1 000 *kVA* produits à la Centrale, combien en recueille-t-on à la sortie des cabines de transformation?

Réponse : environ 720 *kVA.*

2. Une ligne triphasée longue de 20 *km* amène 250 *kW* sous la tension de 10 *kV* à une installation électrique dont le facteur de puissance est cos = 0,8.

Quelle est l'intensité du courant en ligne?

Déterminer le diamètre des conducteurs en cuivre de cette ligne pour que la tension au départ ne dépasse pas 11 000 V.

On tiendra seulement compte de la résistance ohmique de la ligne. Bien que le mode de couplage n'influe pas sur le résultat, on supposera que les phases sont couplées en étoile.

Réponses : 18 *A; fil de* 3,7 *mm ou câble de* 7 *fils de* 14/10.

3. Dans un atelier sont installés un groupe de 20 lampes de 40 watts et un moteur shunt de 15 chevaux dont le rendement est 0,85.

Un groupe convertisseur (moteur asynchrom triphasé + dynamo shunt) situé à 100 mètres, alimente cet atelier par l'intermédiaire d'une ligne en cuivre dont la section est de 18 mm². (Résistivité : 1,8 microhm-cm.)

Sachant que l'ensemble (lampes et moteur) doit fonctionner sous une d. d. p. de 230 volts, on demande :

1°. L'intensité du courant débité par la dynamo.
2°. La résistance de la ligne entre dynamo et atelier.
3°. La différence de potentiel aux bornes de la dynamo, compte tenu de la chute de tension en ligne.
4° La force électromotrice de la dynamo (résistance de l'induit = 0,2 ohm).
5° La puissance utile à fournir par le moteur en kilowatts.
6° Quelle sera l'intensité absorbée par ce moteur sous une différence de potentiel de 380 volts, entre bornes (cosinus φ = 0,9, rendement du moteur 0,85).

Examen du C. A. P. (Électricien-monteur, Électricien-bobineur, Plateforme d'essais)-1947.

10. MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

42e LEÇON

Moteurs asynchrones triphasés.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un moteur à cage de 2 *à* 4 chevaux, 4 *pôles,* 200 volts.
Un interrupteur tripolaire.
Un ampèremètre pour courant alternatif, 10-50 ampères.
Un compte-tours et une montre marquant les secondes ou un tachymètre.
Un wattmètre.
Une dynamo-shunt, 2 *à* 3 kilowatts *avec* 1 *rhéostat de charge.*
Trois bobines de transformateur démontable, de 180 *spires, avec noyaux feuilletés.*
Une petite aiguille aimantée sur pivot.
Une boîte cylindrique en aluminium, diamètre environ 50 mm, *hauteur environ* 30 mm.
Un transformateur triphasé démontable ; primaire : 3 *bobines de* 360 *spires en étoile ; secondaire :* 3 *bobines de* 9 *spires en étoile.*

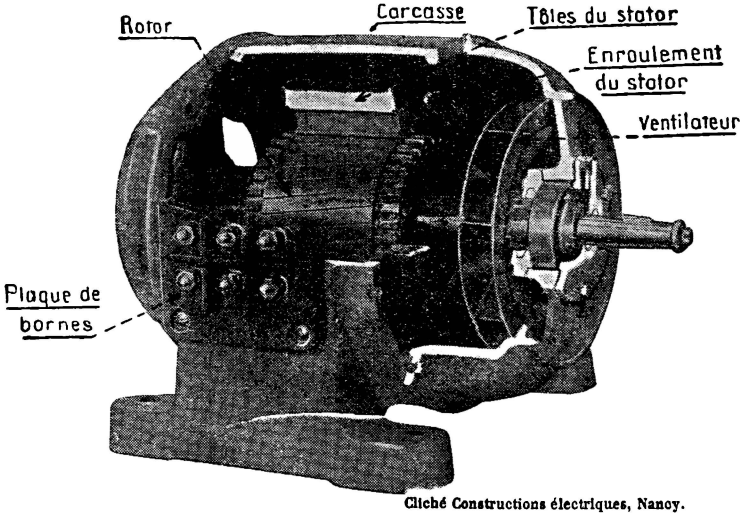
Les expériences sur les champs tournants sont plus faciles à effectuer avec des courants de basse fréquence. Il est facile d'obtenir ces courants si l'on possède un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné. Il suffit de brancher les trois bobines de l'expérience figure 7 *sur les trois bornes du rhéostat de démarrage du moteur. La manette à trois frotteurs du rhéostat sert à régler l'intensité dérivée dans les bobines.*

LEÇON

A. — Étude expérimentale d'un moteur à cage d'écureuil.

1. Examinons un moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit.

Il se compose d'un inducteur fixe ou **stator** et d'un induit mobile ou **rotor** (fig. 1).



Cliché Constructions électriques, Nancy.

FIG. 1. — Vue d'un **moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.** Le stator est en partie coupé. Quel est le rôle du ventilateur?

Le **stator** est constitué par une couronne de tôles empilées et serrées dans une carcasse en fonte.

Débouchant à l'intérieur de l'anneau ainsi formé, des encoches logent trois enroulements triphasés identiques à ceux d'un alternateur. Comme celui d'un alternateur, le stator d'un moteur asynchrone peut être *bipolaire, tétrapolaire, à six pôles*, etc...

La figure 2 représente les enroulements d'un stator tétrapolaire.

Les entrées et les sorties des trois phases aboutissent à une plaque de bornes (fig. 3). Vous remarquerez le décalage des sorties sur les

entrées, qui rend très facile le couplage des enroulements soit en *étoile*, soit en *triangle*.

Le **rotor**, claveté sur l'arbre du moteur, est un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches cylindriques légèrement ouvertes sont percées dans les tôles près de la surface extérieure du cylindre. Une tige de cuivre ou de laiton passe dans chaque encoche, toutes ces tiges sont

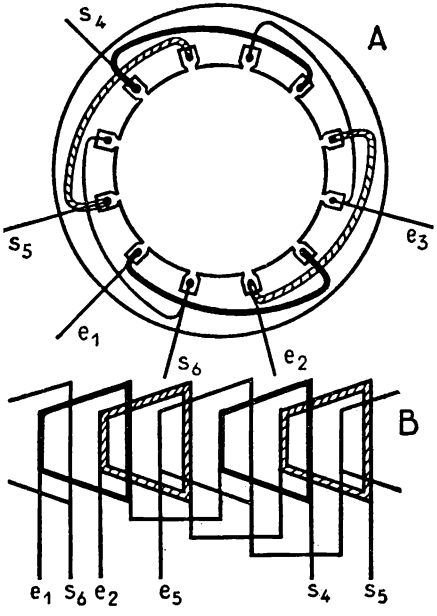


FIG. 2. — Schéma d'un **stator à quatre pôles** :
A — disposition des bobines sur la carcasse.
B — couplage des bobines.

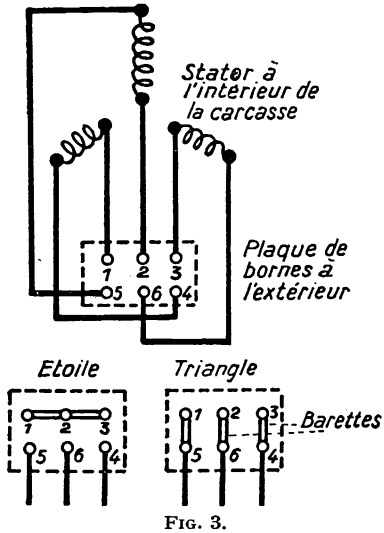


FIG. 3.
Plaque de bornes d'un moteur asynchrone

réunies entre elles par une couronne de cuivre à chaque extrémité du rotor. L'ensemble des conducteurs, considéré sans la carcasse, a ainsi l'aspect d'une cage d'écureuil (fig. 4).

La cage de beaucoup de moteurs de construction moderne est coulée en aluminium d'une seule pièce.

L'**entrefer** entre le stator et le rotor est beaucoup plus petit que celui qu'on laisse entre l'inducteur et l'induit d'un moteur à courant continu ou d'un alternateur : il est de l'ordre du demi-millimètre.

2. Fonctionnement à vide d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Nous nous servons d'un moteur asynchrone triphasé dont la tension d'alimentation est 200 *volts* entre bornes.

Le branchement du moteur sur le réseau est très simple : trois fils amènent le courant de la ligne à la plaque de bornes, en passant par un interrupteur tripolaire. Dans l'une des phases nous mettons un ampèremètre du calibre de 50 *ampères* (fig. 5).

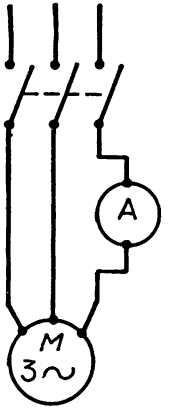


FIG. 5. — Schéma de **branchement d'un moteur à cage d'écureuil.** Remarquez le symbole représentant un moteur asynchrone triphasé.

a) ***Démarrage.*** — Fermons l'interrupteur. Le moteur démarre, il atteint sa vitesse stable en très peu de temps, une fraction de seconde.

A l'instant où l'on enclenche l'interrupteur, l'aiguille de l'ampèremètre est lancée jusqu'à l'extrémité de l'échelle, elle revient ensuite se fixer à 8,7 *ampères* par exemple : c'est l'intensité absorbée par le moteur en marche à vide.

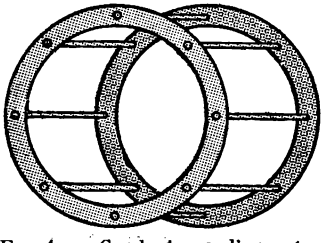


FIG. 4. — Conducteurs d'un **rotor en cage d'écureuil.** La figure 1 montre que le nombre des bornes est, en réalité, beaucoup plus grand que sur ce dessin simplifié.

L'impulsion reçue par l'aiguille au *décollage* est trop brève pour qu'il soit possible de mesurer ainsi l'intensité de pointe, elle montre seulement que cette intensité est grande.

Donc *le* **démarrage** *est brusque et provoque un important* **appel de courant** *sur le secteur.*

Pour arrêter le moteur, il suffit d'ouvrir l'interrupteur.

b) ***Sens de rotation.*** — Repérons le sens de rotation. Intervertissons deux fils de ligne, soit à leur départ à l'interrupteur, soit à leur arrivée aux bornes : *le sens de rotation est changé.*

D'où la règle pratique importante : **on inverse le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé en intervertissant deux des fils d'alimentation.**

c) ***Vitesse de rotation.*** — Nous la mesurons avec un compte-tours, nous trouvons 1 480 *tours par minute.*

d) ***Puissance absorbée.*** — Un wattmètre indique que la puissance absorbée à vide est 360 *watts* pour le moteur étudié.

Vous vous souvenez que la puissance d'un récepteur triphasé est, pour un courant I *ampères* en ligne et une tension U *volts* entre phases :

$$P = UI\sqrt{3}\cos\varphi.$$

Donc le cos φ du moteur à vide a pour valeur :

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI\sqrt{3}} = \frac{360}{200 \times 8{,}7 \times \sqrt{3}} \simeq 0{,}12.$$

Il est faible. Le déphasage entre l'intensité et la tension est important : presque 83°. *L'intensité absorbée par le moteur à vide est surtout réactive.*

3. Fonctionnement du moteur en charge.

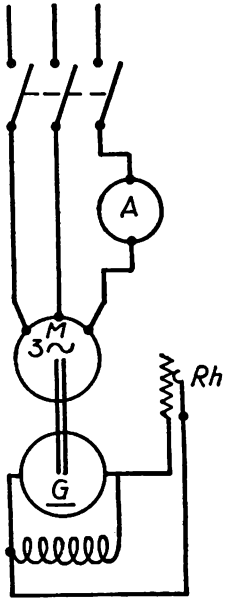


FIG. 6. — Schéma de branchement d'un moteur entraînant une dynamo shunt.

On fait entraîner par le moteur une dynamo excitée en dérivation qui débite dans un rhéostat de charge. En augmentant le débit de la dynamo, on accroît la charge du moteur (fig. 6).

a) ***Démarrage.*** — Le démarrage est un peu plus lent qu'à vide. Nous montrerons plus loin que **la pointe d'intensité est la même qu'à vide.**

b) ***Vitesse de rotation.*** — A demi-charge, le moteur tourne à 1 450 *tours par minute;* à pleine charge, à 1 440 *tours par minute.*

De la marche à vide à la marche à pleine charge, la vitesse du moteur diminue donc de

$$\frac{1\,480 - 1\,440}{14{,}80} \simeq 3 \text{ pour } 100.$$

Cette faible variation est sans importance dans la plupart des cas d'emploi d'un moteur, donc : **la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé est pratiquement constante.**

c) ***Puissance absorbée.*** — Un wattmètre mesure cette puissance : 3 030 *watts* à pleine charge.

Elle est fournie sous 200 *volts* par un courant de 11,6 *ampères.* Le facteur de puissance est :

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI\sqrt{3}} = \frac{3\,030}{200 \times 11{,}6 \times \sqrt{3}} = 0{,}76.$$

Il est bien plus élevé qu'à vide.

La théorie du moteur à cage d'écureuil explique ces constatations.

B. — Théorie du fonctionnement d'un moteur à cage.

4. Avec trois courants triphasés, on produit un champ magnétique tournant.

a) ***Expériences.*** — 1° Trois bobines identiques [1] sont disposées pour que leurs axes fassent entre eux des angles de 120°; elles sont couplées en étoile ou en triangle. Nous les alimentons, soit avec les courants du secteur et un rhéostat triphasé en série, soit par le secondaire du transformateur triphasé démontable équipé pour 200 — 3 *volts*. Au point de rencontre des axes des bobines, plaçons sur un pivot une *petite* aiguille aimantée *très légère* (fig. 7).

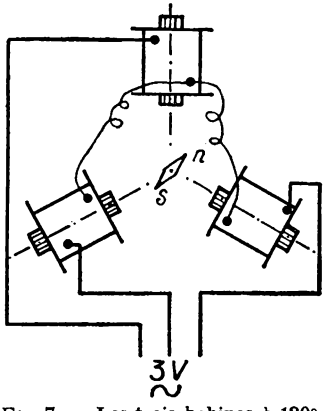


FIG. 7. — Les trois bobines à 120°, parcourues par des courants triphasés, font tourner l'aiguille aimantée après qu'on l'a lancée dans le sens convenable.

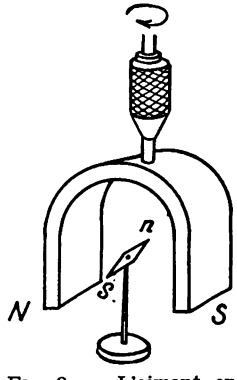


FIG. 8. — L'aimant en fer à cheval qui tourne fait aussi tourner l'aiguille aimantée.

L'aiguille aimantée, *lancée dans le sens convenable*, continue à tourner. Lancée dans le sens contraire, elle s'arrête.

2° Nous produisons de même la rotation de l'aiguille en faisant tourner autour d'elle les pôles d'un aimant en fer à cheval mû par une « chignolle » (fig. 8).

1. Prendre 3 bobines de 180 spires de transformateur démontable, qu'il est utile, mais non indispensable, de munir de noyaux feuilletés.

Donc l'*ensemble de trois bobines parcourues par des courants triphasés produit sur une aiguille aimantée le même effet qu'un aimant tournant : on dit qu'il crée* **un champ magnétique tournant.**

b) ***Démonstration.*** — On établit par le calcul que trois courants triphasés produisent, au point de concours des axes à 120° des bobines qu'ils parcourent, un champ magnétique de grandeur constante qui tourne à raison de 1 tour par période. Si $\mathcal{B}$ *teslas* est l'induction maximum créée par chacun des courants triphasés, le champ tournant résultant a pour induction :

$$\frac{3}{2}\mathcal{B}.$$

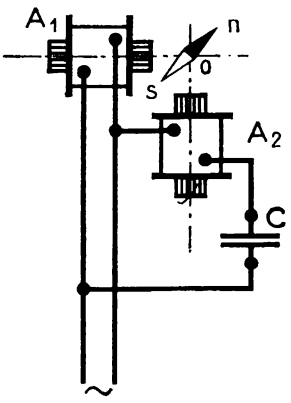


FIG. 9. — Les deux bobines A_1 et A_2, perpendiculaires, parcourues par des courants diphasés, créent en O un champ tournant. L'un des courants est déphasé sur l'autre d'environ 90° parce qu'il traverse un condensateur.

Ce calcul est un peu difficile dans le cas de courants triphasés; il est très simple si l'on considère deux courants diphasés.

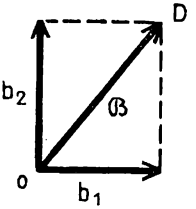


FIG. 10. — La composante des deux inductions alternatives b_1 et b_2, a une grandeur constante $\mathcal{B}$.

Soient deux courants diphasés

$$i_1 = I_m \sin \omega t$$
$$i_2 = I_m \cos \omega t$$

circulant dans deux bobines A_1 et A_2 dont les axes sont à 90° l'un de l'autre (fig. 9).

A un instant déterminé t, chacun de ces courants crée au point O de rencontre des axes une induction alternative proportionnelle à son intensité instantanée et dirigée suivant l'axe de la bobine correspondante (fig. 10). Les valeurs de ces inductions sont

$$b_1 = \mathcal{B} \sin \omega t$$
$$b_2 = \mathcal{B} \cos \omega t.$$

$\mathcal{B}$ désignant l'induction pour l'intensité maximum I_m.

Composons ces deux inductions qui sont perpendiculaires. La résultante est

$$\sqrt{b_1^2 + b_2^2} = \mathcal{B}\sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = \mathcal{B}$$

elle est donc constante.

Elle fait avec l'axe de A_2 un angle α tel que

$$b_2 = \mathcal{B} \cos \alpha \text{ (fig. 11).} \qquad (2)$$

En comparant les deux relations (1) et (2) vous voyez que

$$\alpha = \omega t.$$

Le champ de valeur constante tourne donc à vitesse constante autour du point O à raison de 1 tour par période (fig. 11).

Quand on intervertit les fils qui amènent l'un des courants, par exemple i_2 à la bobine A_2, la formule de ce courant devient

$$i_2 = - I_m \cos \omega t.$$

En recommençant l'étude qui précède, on établit que le sens de rotation du champ magnétique résultant est inversé.

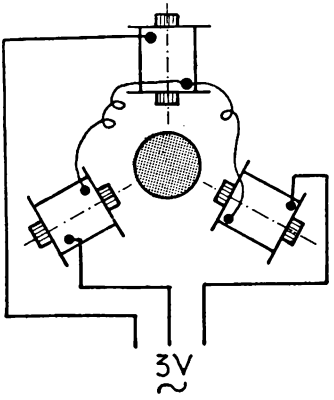


FIG. 12. — Le champ tournant dû aux trois bobines fait tourner une boîte d'aluminium monté sur un pivot.

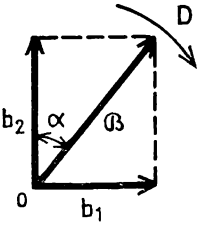


FIG. 11. — L'induction ß tourne autour du point O dans le sens de la flèche à raison de 1 tour par période des courants d'alimentation.

5. Un champ tournant entraîne un rotor conducteur.

a) ***Expérience.*** — Reprenons l'expérience de la figure 7, en remplaçant l'aiguille aimantée par une boîte cylindrique en aluminium placée sur un pivot (fig. 12).

L'aluminium n'est pas magnétique, pourtant, quand des courants triphasés passent dans les bobines, la boîte se met à tourner dans le sens où tournait l'aiguille aimantée.

Le champ tournant dû aux courants triphasés entraîne le rotor d'aluminium.

Le dispositif expérimental réalisé est la simplification d'un moteur asynchrone bipolaire à rotor en court-circuit : les trois bobines figurent le stator, la boîte d'aluminium sert de rotor.

b) ***Ce sont des courants induits qui font tourner le rotor.***

Le champ tournant bipolaire, dû aux courants des bobines, tourne dans l'espace à raison de 1 tour par période des courants d'alimentation. A cette vitesse, on donne le nom de **vitesse de synchronisme.** Elle est, à la fréquence standard des secteurs, de 50 *tours par seconde,* soit N = 3 000 *tours par minute.*

Au **décollage,** à l'instant où le rotor est encore immobile, le champ se déplace à la vitesse de synchronisme dans l'aluminium de la boîte. Il y induit des courants alternatifs à la fréquence de 50 *périodes par seconde.* Des forces électromagnétiques s'exercent entre le champ et les courants. Ce sont ces forces, en l'espèce répulsives, qui produisent le mouvement.

Le rotor tourne dans le même sens que le champ, conformément à la loi de Lenz, puisque ce sens réduit la vitesse relative du champ par rapport au rotor.

Quand le démarrage est terminé, le rotor tourne à la vitesse N′, le champ continue à tourner à la vitesse N ; il se déplace dans le rotor à la vitesse relative N − N′, les courants rotoriques sont à la fréquence

$$\frac{N - N'}{60} \text{ périodes par seconde.}$$

Remarquez que *la vitesse N′ du rotor reste toujours inférieure à la vitesse de synchronisme N.* Les deux vitesses ne peuvent s'égaler, car il n'y aurait plus de variation de flux dans le rotor, pas de courants induits et pas de forces électromagnétiques pour entretenir la rotation du rotor.

On donne au rapport $g = \frac{N - N'}{N}$ *le nom de* **glissement.**

C'est parce que la vitesse N′ du rotor est différente de la vitesse N de synchronisme que l'on donne aux moteurs que nous étudions le nom de **moteurs asynchrones**; parce qu'ils fonctionnent grâce à des courants induits dans le rotor, on les nomme aussi **moteurs d'induction.**

C. — Propriétés des moteurs asynchrones à cage.

6. Dans les moteurs asynchrones industriels, les champs tournants sont radiaux.

Les conducteurs du stator et du rotor sont montés sur des carcasses en fer, aussi le flux magnétique est-il réparti dans l'entrefer comme l'indique la figure 13 pour un moteur bipolaire. Cette répartition est à peu près sinusoïdale et c'est cet ensemble qui tourne dans l'entrefer à la vitesse de synchronisme.

La plupart des moteurs usuels sont **multipolaires.** Les stators, bobinés comme ceux des alternateurs, sont à 4, 6, 8, ...2 *p* pôles. La figure 14 représente la répartition du flux dans l'entrefer d'un moteur *tétrapolaire.*

A chaque période des courants d'alimentation, les pôles tournent de $\frac{1}{p}$ tour. Il en résulte que si la fréquence des courants statoriques est f *périodes par seconde*, les pôles tournent de $\frac{f}{p}$ *tours par seconde*, la vitesse de synchronisme est donc

$$N = \frac{60\ f}{p} \textit{ tours par minute.}$$

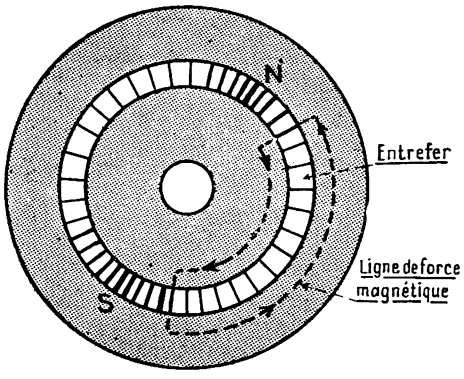


FIG. 13. — **Flux sinusoïdal tournant** dans l'entrefer d'un moteur asynchrone bipolaire. La longueur de l'entrefer a été très exagérée pour que les lignes de force soient visibles.

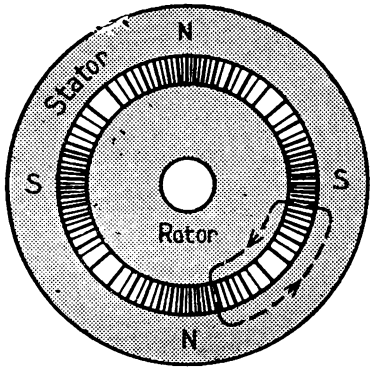


FIG. 14. — **Répartition du flux** à un instant déterminé dans l'entrefer d'un **moteur tétrapolaire.** Ce flux tourne dans l'entrefer à une vitesse $N = 60f$ 2 : *t/mn*. Le rotor tourne dans le même sens à une vitesse $N' < N$.

Avec la fréquence standard de 50 *p/s*, les vitesses de synchronisme sont par conséquent :

moteur à 2 pôles : $N = 60 \times 50 = 3\,000$ *t/mn*

— 4 — $N = \frac{60 \times 50}{2} = 1\,500$ —

— 6 — $N = \frac{60 \times 50}{3} = 1\,000$ —

— 8 — $N = \frac{60 \times 50}{4} = 750$ —

7. Vitesses en charge des moteurs asynchrones.

Vous avez constaté que le glissement augmente avec la charge. Il est aussi plus grand pour les petits moteurs que pour les moteurs puissants.

Voici quelques valeurs approximatives du glissement à pleine charge :

$g = 7$ % pour un moteur de 1 *kW*,
$g = 5{,}5$ % — 5 *kW*,
$g = 4{,}5$ % — 10 *kW*,
$g = 2{,}5$ % — 50 *kW*,
$g = 1{,}5$ % — 100 *kW*.

De la formule de définition du glissement $g = \frac{N - N'}{N}$, on tire :

$$N' = N\,(1 - g).$$

Donc les vitesses en charge des moteurs d'induction diffèrent peu des vitesses de synchronisme. Ces vitesses ne sont pas réglables pratiquement.

La gamme des vitesses est fort espacée, surtout entre 750 et 3 000 *tours par minute* : c'est un défaut grave de ce type de moteurs.

8. Courant absorbé par un moteur à cage d'écureuil.

a) ***Au décollage***, vous avez constaté que l'intensité absorbée par le stator est grande.

Pour expliquer ce fait, remarquons qu'*un moteur asynchrone arrêté ressemble à un transformateur* : le stator joue le rôle de primaire, le rotor de secondaire. Quand le rotor est en cage d'écureuil, ce secondaire est fermé sur lui-même. A cause de cette mise en court-circuit, le courant absorbé est intense.

Cette analogie fournit un moyen de déterminer le courant de décollage d'un moteur à rotor en court-circuit. On bloque le rotor pour l'empêcher de tourner, puis on applique au stator le tiers ou le quart de la tension normale. On mesure la tension employée U' et l'intensité absorbée I'. Le courant qui correspond à la tension normale U est à peu près :

$$I = I' \times \frac{U}{U'}.$$

C'est la pointe de courant au démarrage.

Par exemple, pour le moteur employé dans cette leçon, une tension U' de 60 *volts* produit dans les conditions indiquées une intensité I' = 10,8 *ampères*. La pointe au démarrage sous U = 200 *volts*, est environ

$$I = \frac{10{,}8 \times 200}{60} = 36 \text{ ampères,}$$

soit un peu plus de 3 fois le courant à pleine charge 11,6 *ampères.*

Dans ce calcul, la charge du moteur n'intervient pas, donc *la pointe de courant au décollage du moteur est la même que le moteur soit à vide ou en charge.*

b) ***Au cours du démarrage,*** à mesure que le moteur tourne plus vite, la vitesse relative N — N′ du flux dans le rotor diminue et, par conséquent, l'intensité des courants induits dans le rotor décroît ainsi que celle qu'absorbe le stator (fig. 15).

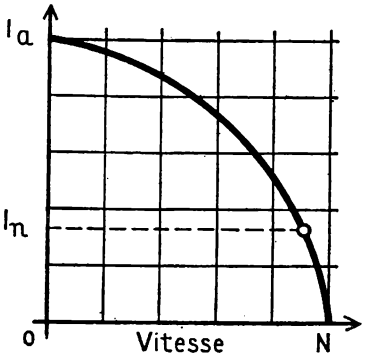


FIG. 15. — Variations du **courant absorbé par un moteur à cage** au cours du démarrage. Le courant en marche normale est I_n. Le courant au décollage est 3 fois plus grande.

9. Couple d'un moteur asynchrone à cage.

Remarquons d'abord que les barres de la cage sont peu résistantes et que, noyées dans du fer, elles ont une self-induction importante.

Au décollage, les courants induits dans ces barres sont à la fréquence assez élevée du secteur, la réactance $L\omega$ des barres est grande par rapport à leur résistance R. Le déphasage des courants $\left(\text{tg}\,\alpha = \frac{L\omega}{R}\right)$, par rapport à la f.é.m. induite et au flux qui la produit, est important, donc les forces électromagnétiques sont faibles : *le couple du moteur au démarrage est peu élevé.*

Pendant le démarrage, à mesure que la vitesse du rotor se rapproche de la vitesse de synchronisme, deux phénomènes, dont les effets sur le couple sont opposés, se produisent simultanément :

1° L'intensité des courants induits diminue et de ce fait le couple tend à décroître.

2° La fréquence des courants induits diminue et avec elle la réactance de self du rotor. Le déphasage de ces courants par rapport au flux magnétique décroît, les forces électromagnétiques et, par suite, le couple du moteur tendent à augmenter.

La figure 16 représente les variations de ce couple quand la vitesse

du rotor N′ croît depuis zéro jusqu'à la vitesse de synchronisme. Le couple passe par un maximum. On démontre :

1° Que la valeur du maximum dépend du flux tournant et de la self des conducteurs du rotor, mais non de leur résistance;

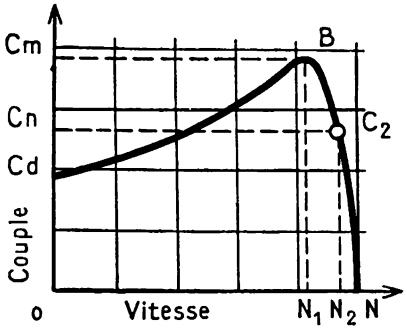


FIG. 16. — Variations du **couple d'un moteur à cage** au cours du démarrage. Le couple en marche normale en charge est C_n, le couple au démarrage C_d, le couple maximum C_m. Si l'on demande au moteur un couple plus grand que C_m, il cale.

2° Que ce maximum est atteint à une vitesse plus faible quand le rotor est plus résistant; nous utiliserons cette propriété à propos des rotors bobinés.

10. La courbe du couple indique la région de fonctionnement stable d'un moteur.

Le fonctionnement est stable quand la vitesse est comprise entre N_1 et N par exemple N_2 (fig. 16). Le couple correspondant est représenté en C_2 sur l'arc BN.

Quand la charge du moteur diminue, son couple décroît et sa vitesse augmente.

Quand la charge augmente, le couple croît et la vitesse diminue.

Toutefois si le nouveau couple dépasse le couple maximum du moteur, la vitesse diminue brusquement à partir de N_1, le moteur s'arrête, on dit qu'il *cale*. Presque toujours, les coupe-circuit fusibles fondent.

11. Rendement d'un moteur asynchrone.

Les pertes dans le moteur sont :

1° Des *pertes constantes* quelle que soit la charge: ce sont les pertes mécaniques par frottement et les pertes magnétiques par hystérésis et courants de Foucault;

2° Des *pertes croissant avec la charge:* ce sont les pertes en chaleur Joule dans les enroulements.

Le rendement à pleine charge dépasse 0,90 pour les gros moteurs, il est d'environ 0,75 pour les petits. La figure 17 indique comment ce rendement varie avec la charge pour un moteur déterminé.

Le cos φ d'un moteur varie à peu près comme le rendement. Il est mauvais à faible charge (fig. 18), aussi faut-il éviter d'employer des moteurs plus puissants qu'il n'est nécessaire pour le travail à effectuer.

Vous savez que lorsqu'on indique la puissance d'un moteur c'est de la puissance utile, livrable à la poulie, qu'il s'agit. On l'évalue en *kilowatts* ou en *chevaux.*

Soit à calculer le courant absorbé à pleine charge par un moteur asyn-

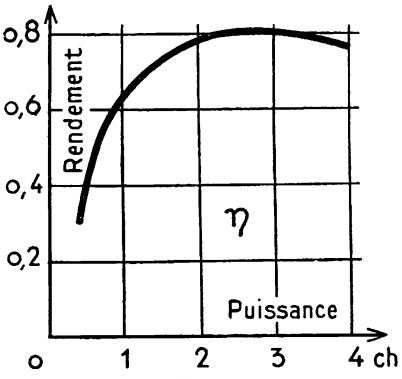


FIG. 17. — Courbe d'un **rendement** en fonction de la charge d'un moteur à cage de 4 *ch.*

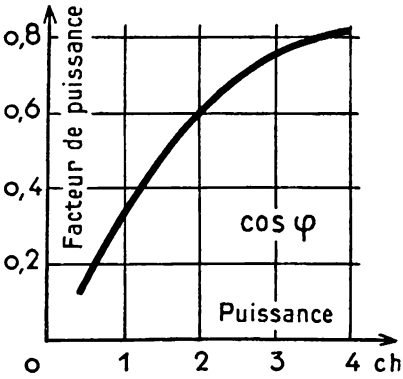


FIG. 18. — Courbe du **cos φ** en fonction de la charge d'un moteur à cage de 4 *ch.*

chrone triphasé dont on connaît la puissance P watts, *la tension d'alimentation U* volts, *le facteur de puissance* cos φ *et le rendement* η.

On se sert de la relation

$$P = U.\ I.\ \sqrt{3}.\ \cos\varphi.\ \eta$$

d'où l'on tire :

$$I = \frac{P}{U.\ I.\ \sqrt{3}.\ \cos\varphi.\ \eta}.$$

Le facteur de puissance et le rendement sont indiqués par le constructeur du moteur; à défaut de cette indication, on peut admettre comme valeurs moyennes, pour un moteur de 5 à 6 *chevaux,* cos φ = 0,80, η = 0,80.

RÉSUMÉ

1. — Le *stator* des moteurs asynchrones triphasés est bobiné comme un stator d'alternateur, à deux, quatre, huit pôles ou davantage. Les trois enroulements sont connectés soit en étoile, soit en triangle.

Le *rotor* des moteurs à cage d'écureuil est composé de tiges de cuivre logées dans des encoches et réunies par une couronne de cuivre sur chaque face du rotor.

2. — Les courants triphasés qui alimentent le stator créent des champs tournants dans l'entrefer du moteur. Ces champs induisent des courants dans les conducteurs du rotor. Les forces électromagnétiques qui s'exercent entre les champs et les courants induits font tourner le rotor.

3. — La vitesse N′ du rotor est inférieure à la vitesse N des champs tournants dite *vitesse de synchronisme*. Le glissement du rotor

$$g = \frac{N - N'}{N}$$

ne dépasse pas quelques centièmes.

4. — Au décollage, un moteur à cage absorbe un courant de grande intensité, surtout réactif. Le courant diminue quand la vitesse augmente et le cos φ croît.

Le couple du moteur, assez faible au décollage, croît d'abord quand la vitesse augmente, passe par un maximum et diminue ensuite.

Quand sa charge augmente, le moteur ralentit un peu. Si la charge devient trop grande, le moteur s'arrête bruquement : il *cale*.

5. — La puissance en watts qu'un moteur fournit sur sa poulie se calcule avec la formule

$$P = U.I.\sqrt{3}.\cos\varphi.\eta.$$

EXERCICES

1. Un moteur asynchrone triphasé, alimenté par des courants à 50 *p/s*, tourne à 970 *t/mn*. Quel est son nombre de pôles? Quel est son glissement.

Réponses : 6 *pôles* — 3 %.

2. Calculer le courant absorbé à pleine charge par un moteur triphasé de 50 *ch*, 550 *V*, dont le rendement est 0,87 et le facteur de puissance 0,85.

Réponse : 52,5 *ampères.*

3. Avec un inverseur tripolaire on peut brancher un moteur d'induction triphasé pour qu'il tourne à volonté dans un sens ou dans l'autre. Faire le schéma du branchement.

4. Quel est approximativement le courant absorbé par cheval par des moteurs d'induction alimentés sous 200 *volts* triphasés? Chercher dans la leçon les données nécessaires pour calculer la réponse à la question.

Réponse : environ 3,3 *ampères.*

5. Un moteur asynchrone triphasé absorbe 16 *ampères* sous 200 *volts*, son facteur de puissance est 0,80, son rendement 0,80; il tourne à 1 440 *tours par minute*. Calculer le couple qu'il fournit sur sa poulie.

Réponse : 2,4 *m.kg.*

6. Compléter le tableau suivant :

MOTEURS TRIPHASÉS	PUISSANCE EN CHEVAUX	PUISSANCE EN WATTS	TENSION	INTENSITÉ ABSORBÉE	COS φ	RENDEMENT
a	5	. . . .	200	. . . .	0,80	0,82
b	. . . .	4 100	380	10	. . . .	0,79
c	3,25	. . . .	120	16,6	0,81	. . . .
d	. . . .	. . . .	550	50	0,87	0,85
e	. . . .	30 000	. . . .	100	0,89	0,88

PROBLÈMES D'EXAMENS

1. Un meunier dispose dans son moulin d'une dynamo produisant du courant continu sous une tension de 200 V et dont toute la puissance n'est pas utilisée.

Il désire, avec la puissance disponible, desservir l'une de ses fermes voisines par une ligne de 200 *m* de long, dans laquelle la perte de puissance ne devra pas dépasser 5 %.

L'installation de la ferme comportera : un moteur de 5 *ch* et un moteur de 3 *ch* dont le rendement est de 0,89 pour chacun d'eux; 3 lampes de 25 W, 5 de 40 W et 6 de 100 W; l'ensemble pouvant fonctionner en même temps.

Le meunier désire que vous lui indiquiez :

1° la section convenable du conducteur en cuivre de résistivité 0,018 Ω/m/mm² et de densité 8,9 que l'on devra commander pour construire la ligne;

2° la longueur du fil à commander et son prix à raison de 45 000 *f* la tonne, en tenant compte d'une majoration de la longueur réelle de 5 % pour déchets, flèches et épissures. *Réponses :* 26,4 mm², soit 5,8 *mm* de diamètre; — 420 *m*; — 4 440 f.

2. Une cuisinière électrique, destinée à fonctionner sur une installation triphasée à 200 V entre phases, comporte les éléments suivants : un four de 1 000 W, une plaque à feu vif de 1 800 W, et deux plaques fonte de respectivement 1 200 et 2 000 W. A pleine puissance, l'installation est équilibrée.

Elle est située à 20 *m* du compteur général où est livrée l'énergie électrique.

On demande de calculer :

1° la consommation horaire de l'appareil à pleine puissance et le prix de revient d'une heure d'utilisation à raison de 5,75 *f* le *kWh*;

2° la section des conducteurs qui relient cette cuisinière au compteur qui sont en cuivre de résistivité 0,018 Ω.mm²/m en admettant une chute de tension de 5 % entre phases et une densité de 3 *A/mm²* ;

3° le diamètre de ces conducteurs qui sont constitués par un fil cylindrique *Réponses :* 6 *kwh*; 34,50 *f* — 5,77 *mm²* ; — 2,75 *mm*, soit câble de 7 fils 10/10.

(*C. A. P. monteur-électricien, Paris*, 1948.)

Moteurs asynchrones (suite).

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Un moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit pouvant être démarré par couplage étoile-triangle.
Un interrupteur triphasé.
Un inverseur triphasé.
Un moteur asynchrone triphasé à double cage (à défaut des tôles de stator et de rotor d'un tel moteur).
Un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné, avec son rhéostat de démarrage.
Un contacteur-disjoncteur.

LEÇON

A. — Démarrage des moteurs à cage.

1. L'absorption d'une forte pointe de courant au démarrage est un défaut des moteurs à cage.

Nous avons calculé que cette pointe dépasse 3 fois le courant normal pour un certain moteur de 3,5 *chevaux*. Elle atteint 5 fois le courant normal pour d'autres moteurs.

Quand des lampes et des moteurs sont branchés sur la même ligne d'alimentation, les chutes de tension dues aux pointes de décollage produisent une diminution désagréable de la lumière émise par les lampes ; aussi les secteurs interdisent-ils l'emploi, dans les installations à basse tension, de moteurs à cage de plus de 2 *chevaux* à démarrage direct.

2. Des artifices de démarrage remédient en partie à ce défaut.

1° ***Démarrage en étoile-triangle.*** — *Ce procédé n'est possible qu'avec un moteur construit pour fournir sa puissance normale sous la tension U de la ligne quand les trois enroulements du stator sont couplés en* **triangle.**

Il consiste à coupler le stator en étoile pendant le démarrage, puis à rétablir son couplage en triangle quand le moteur atteint presque sa vitesse de régime.

Un *inverseur tripolaire* suffit pour changer en même temps les connexions des phases du stator entre elles et avec le réseau. Toutefois un *interrupteur tripolaire* est nécessaire sur la ligne d'alimentation pour ne pas laisser la tension sur le stator à l'arrêt (fig. 1).

Vous avez vu dans la 38e leçon qu'un récepteur triphasé qui absorbe un courant I sous une tension U quand ses trois phases sont couplées

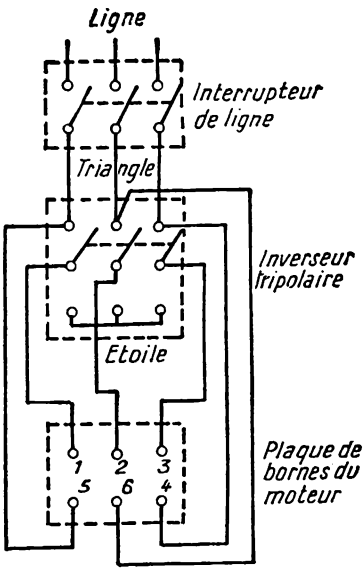


FIG. 1. — Schéma d'un **démarreur étoile-triangle.**

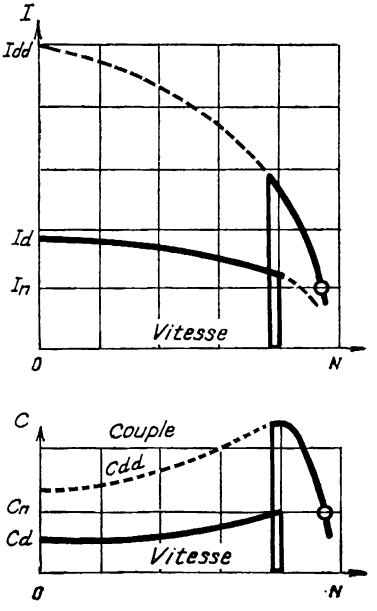


FIG. 2. — **Courant et couple** pendant le démarrage étoile-triangle d'un moteur. La vitesse N est la vitesse de synchronisme.
Remarquez la coupure de courant au changement de couplage.

en triangle, n'absorbe plus qu'un courant I : 3 quand il est couplé en étoile sous la même tension. Sa puissance est également réduite au tiers.

Cette réduction du couple de démarrage proscrit le procédé étoile-triangle dans certains cas de démarrage en charge où le couple à fournir est important dès le décollage.

La figure 2 indique les variations du courant et du couple au cours d'un démarrage en étoile-triangle. Elle montre la coupure des courants

statoriques au moment du changement de couplage. Cette coupure est un défaut de ce procédé.

On lui reproche aussi de nécessiter six conducteurs pour relier le moteur au démarreur.

2° Démarrage par élimination de résistances en série avec le stator. — Ce mode de démarrage ressemble à celui des moteurs à courant continu.

On insère en série avec le stator des résistances qui réduisent la tension aux bornes des enroulements au décollage. Quand le moteur tourne à bonne vitesse, on court-circuite ces résistances, en général en une seule fois. Le démarrage s'effectue alors en deux temps.

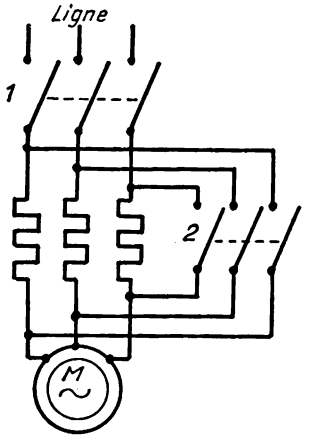


FIG. 3. — Démarrage par élimination de **résistances en série avec le stator.** On ferme 1, puis 2.

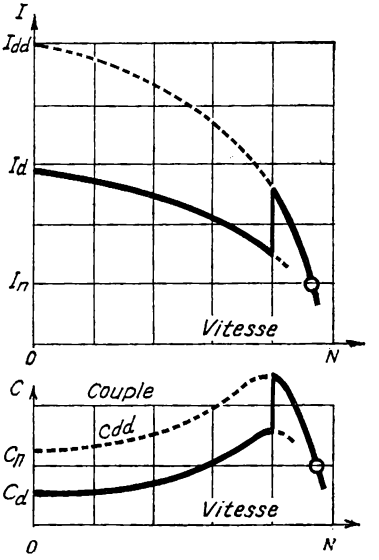


FIG. 4. — **Courant et couple** pendant le démarrage d'un moteur par élimination de résistances statoriques.

Deux interrupteurs tripolaires suffisent pour l'opération (fig. 3).

La figure 4 représente les variations du courant et du couple pendant le démarrage.

Le courant dans le stator n'est plus interrompu au cours du démarrage. Trois fils suffisent pour connecter le démarreur au moteur.

3° Démarrage avec un auto-transformateur. — La tension du réseau est appliquée aux bornes 1, 2, 3 d'un auto-transformateur

(fig. 5). On prend en 1′, 2′, 3′ la tension qui convient pour obtenir une intensité modérée et un démarrage franc. En fermant l'interrupteur de ligne, on applique cette tension au moteur : c'est le premier temps du démarrage.

Au deuxième temps, on supprime la connexion formant le point neutre de l'auto-transformateur. Le stator est alimenté en série avec trois bobines de self.

Au troisième temps, on court-circuite les selfs.

Ce mode de démarrage n'est employé que pour les très gros moteurs.

Vous remarquez que les trois procédés de démarrage que nous venons d'indiquer ne sont pas parfaits : s'ils diminuent, comme on le désire, l'intensité de décollage, ils réduisent en même temps le couple de démarrage, ce qui est un inconvénient.

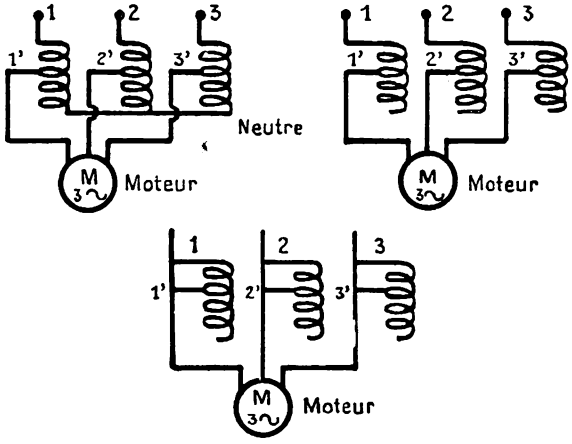


FIG. 5. — Démarrage d'un moteur à cage avec un **auto-transformateur**, en trois temps.

B. — Moteurs à double cage.

3. Constitution d'un tel moteur.

Le **stator** n'a rien de particulier.

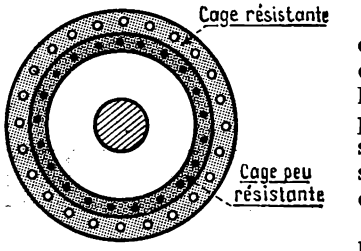


FIG. 6. — Vue en bout d'un **rotor à double cage.**

Le **rotor** possède deux cages d'écureuil concentriques (fig. 6). La *cage extérieure* est cinq à six fois plus résistante que l'autre ; ses encoches, ouvertes, sont percées très près de l'entrefer : en somme, sa résistance est plus grande et sa self-induction plus petite que celles d'une cage ordinaire.

La *cage intérieure* est peu résistante ; les barres en sont noyées profondément dans le fer : sa self-induction est importante.

4. Fonctionnement.

Au *décollage*, la fréquence, égale à celle du secteur, des courants induits dans le rotor est relativement élevée; ces courants circulent surtout dans la cage extérieure, la moins inductive. Parce que la cage est résistante, le maximum du couple qui s'y produit est atteint à faible vitesse. *La cage extérieure est la cage de démarrage.*

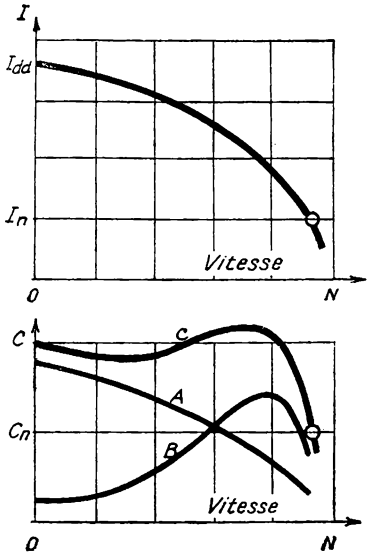


FIG. 7. — **Courant et couple** pendant le démarrage d'un moteur à double cage :
A — couple dû à la cage extérieure;
B — couple dû à la cage intérieure;
C — couple total.

En *marche normale*, la fréquence des courants rotoriques est très basse, ces courants parcourent surtout la cage intérieure, la moins résistante. *La cage intérieure est la cage de travail.*

La figure 7 représente les variations du courant au cours du démarrage, les couples des deux cages et le couple total. Le courant au décollage est moins grand que pour un moteur à simple cage et le couple de démarrage plus important.

5. Emploi des moteurs à double cage.

Ces moteurs conviennent pour les démarrages en charge ou pour la commande de machines à grande inertie.

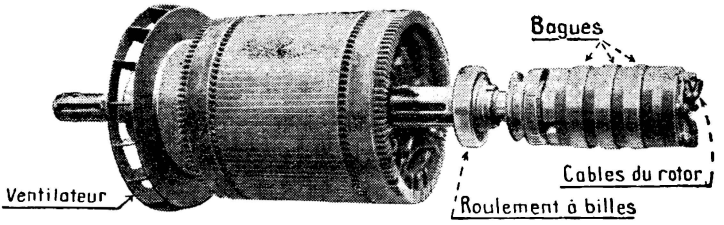
Les modes de démarrage des moteurs à simple cage leur sont applicables.

C. — Moteurs à rotor bobiné.

6. Description d'un rotor bobiné.

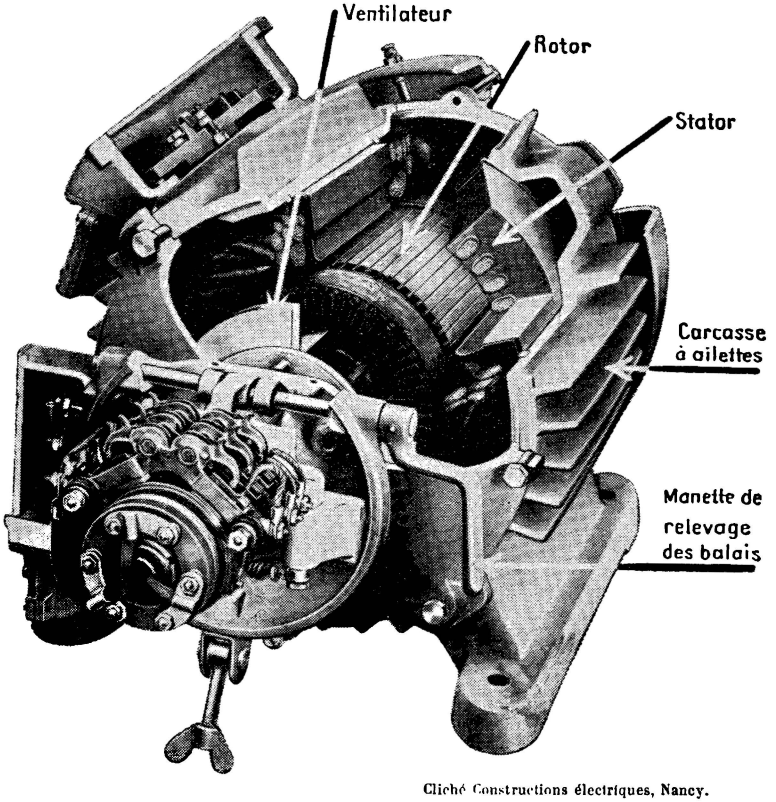
La carcasse du rotor porte des encoches comme celles du stator, mais en nombre différent. Dans ces encoches sont logés trois enroulements triphasés, en général couplés en étoile. Les trois extrémités libres aboutissent à trois bagues isolées clavetées sur l'arbre (fig. 8).

Avec trois balais frottant sur les bagues, on ajoute, au démarrage, à chaque phase du rotor, une résistance qui est de 10 à 15 fois celle de



Cliché Constructions électriques, Nancy.

FIG. 8. — **Rotor bobiné.** Les trois bagues sont réunies aux trois enroulements du rotor par trois conducteurs à l'intérieur de l'arbre.



Cliché Constructions électriques, Nancy.

FIG. 10. — **Moteur à rotor bobiné.** Un dispositif de relevage des balais court-circuite les bagues quand le démarrage est terminé.

l'enroulement. Les trois résistances sont réunies dans un rhéostat et fractionnées en plusieurs parties connectées à trois arcs de plots. On les couple en étoile par une manette à trois frotteurs. Les résistances sont sorties graduellement du circuit du rotor pendant le démarrage (fig. 9). En marche normale, les trois bagues du rotor sont réunies en court-circuit (fig. 10).

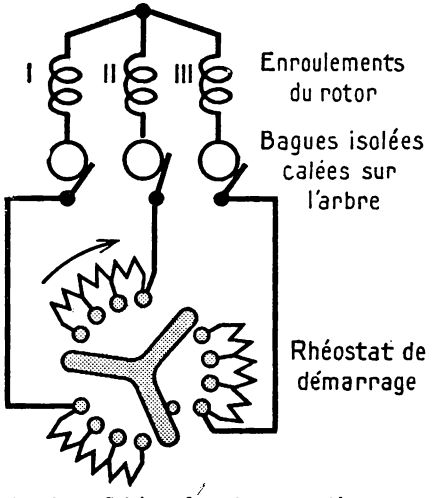


FIG. 9. — Schéma du rhéostat de démarrage d'un moteur à rotor bobiné.

7. Fonctionnement d'un moteur à rotor bobiné.

La figure 11 rassemble les courbes des couples du moteur pour différentes résistances des phases du rotor.

Vous remarquez que la valeur maximale du couple est la même pour toutes les résistances du rotor et qu'elle est atteinte pour une vitesse plus faible si la résistance rotorique est accrue.

Au cours du démarrage, on passe d'une courbe à l'autre en maintenant le couple à une valeur proche du maximum.

Le courant absorbé peut n'être que peu supérieur au courant normal en charge.

On arrête un moteur à rotor bobiné, soit en ouvrant l'interrupteur d'alimentation, soit en ramenant la manette du rhéostat de démarrage aux plots morts. Avant de démarrer à nouveau le moteur, il faut s'assurer que le rhéostat est bien sur sa position de départ.

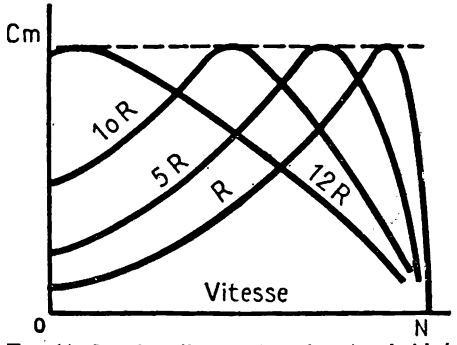


FIG. 11. Couples d'un moteur à rotor bobiné pour différentes résistances du rotor.

La plupart des moteurs asynchrones de moyenne et de grande puissance sont construits à rotor bobiné.

D. — Détermination des lignes de branchement des moteurs asynchrones triphasés.

8. Cas des moteurs à cage.

Comme pour les installations d'éclairage, on calcule l'intensité du courant en charge normale et l'on choisit la section des conducteurs pour satisfaire aux conditions d'échauffement et de chute de tension (5 %).

La surintensité pendant le démarrage est si brève qu'il n'est pas indispensable d'en tenir compte pour déterminer le diamètre de la ligne d'alimentation. Toutefois, elle oblige à augmenter le calibre des coupe-circuit fusibles employés. Ces coupe-circuit ne protègent plus efficacement le moteur en marche normale et il est prudent de les remplacer par des disjoncteurs thermiques à bilames.

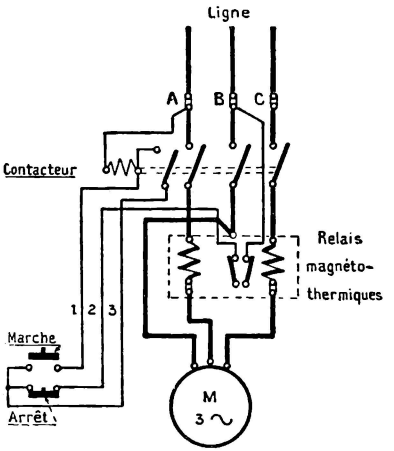
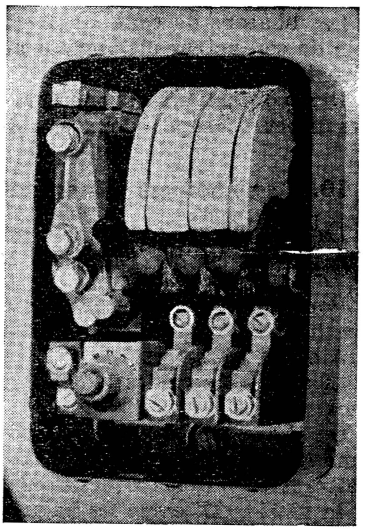


FIG. 12.
Schéma d'un **contacteur-disjoncteur.**



Cl. La Télémécanique électrique.

FIG. 13. — **Contacteur-disjoncteur** pour moteur à rotor en court-circuit.

9. Contacteurs-disjoncteurs.

Ce sont des appareils très commodes pour commander de près ou à distance et protéger les moteurs à rotor en court-circuit.

La figure 12 en est le schéma.

Un *contacteur* comprend les organes suivants :

1° Un *interrupteur tripolaire* qui se ferme sous l'action d'un électro-aimant à courant alternatif branché entre deux phases.

Un bouton marqué « Marche » ferme le circuit de l'électro-aimant, le courant d'excitation est maintenu par un petit interrupteur unipolaire solidaire de l'interrupteur principal.

On coupe l'excitation et l'on déclenche ainsi l'interrupteur en appuyant sur un bouton marqué « Arrêt ».

2° Un *disjoncteur électromagnétique* qui coupe le courant dans deux fils de phase en cas de surintensité importante.

3° Un *disjoncteur à bilame* interrompant le courant dans l'électro-aimant quand deux des conducteurs de phases s'échauffent de façon anormale.

Les boutons de commande « Marche » et « Arrêt » peuvent se placer loin du contacteur-disjoncteur auquel ils sont réunis par trois fils souples bien isolés.

Des contacteurs-disjoncteurs plus compliqués servent à contrôler des moteurs à cage à deux sens de rotation et des moteurs à rotor bobiné.

10. Branchement d'un moteur à rotor bobiné.

La ligne triphasée d'alimentation se détermine après calcul de l'intensité qui la parcourt à pleine charge.

Pour choisir les conducteurs qui réunissent le rhéostat de démarrage aux bagues du rotor, il faut connaître le courant dans le rotor.

A cause de sa très faible fréquence, il n'est pas possible de le mesurer avec un ampèremètre : l'aiguille de l'instrument oscille très fortement sans se fixer.

On détermine approximativement le courant rotorique en considérant le moteur comme un transformateur, dont on évalue le rapport de transformation en mesurant la tension U entre les bornes du stator et la tension U′ entre les bagues du rotor arrêté quand les frotteurs du rhéostat de démarrage se trouvent sur les plots morts.

Le rapport de transformation est $\frac{U}{U'}$.

Le courant rotorique I_r à charge normale est :

$$I_r = I \times \frac{U}{U'}.$$

I désignant le courant dans le stator à pleine charge.

Exemple. — *Calcul du courant à pleine charge dans le stator et dans le rotor d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné de* 10 chevaux, 200 volts. *Rendement :* 0,85, *facteur de puissance :* 0,80, *tension entre les bagues du rotor arrêté :* 60 volts.

Le courant I à pleine charge absorbé par le stator se calcule avec la relation

$$P = U.\ I.\ \sqrt{3}.\ \cos\varphi.\ \eta,$$

soit $736 \times 10 = 200 \times I \times \sqrt{3} \times 0{,}80 \times 0{,}85.$

On obtient $I = 31$ *ampères.*

Le rapport de transformation stator-rotor est $\frac{U}{U'} = \frac{200}{60} = 3{,}3.$

Le courant dans le rotor a pour valeur :

$$I_r = I \times 3{,}3 = 102 \text{ ampères.}$$

RÉSUMÉ

1. — Pour réduire la pointe de courant d'un moteur à cage au démarrage, on emploie les procédés de démarrage suivants :

1° *par couplage étoile-triangle*, la pointe de courant est réduite au tiers, ainsi que le couple pendant le premier temps du démarrage ;

2° *par élimination de résistances en série avec le stator*, ces résistances sont calculées pour réduire la pointe de décollage à la valeur que l'on désire le couple de démarrage est diminué dans la même proportion ;

3° *en employant un auto-transformateur* dans le cas de moteurs très puissants.

2. — Les *moteurs à double cage* absorbent un courant moindre au décollage que les moteurs à simple cage, leur couple de démarrage est plus élevé.

3. — Les *moteurs à rotor bobiné* sont munis d'un rhéostat de démarrage en série avec le rotor.

EXERCICES

1. Calculer les courants à pleine charge dans le stator et le rotor d'un moteur asynchrone triphasé de 50 *chevaux*, 550 *volts*.

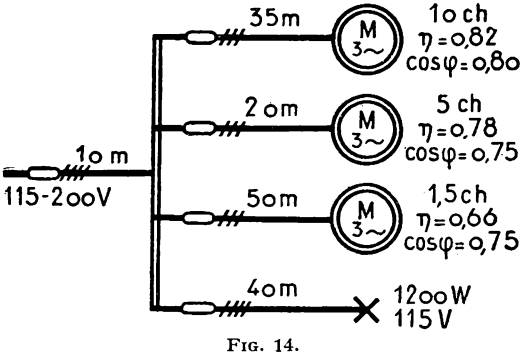


FIG. 14.
Schéma d'une installation force lumière (exercice 2).

Rendement : 0,85, cos φ = 0,87, tension entre bagues du rotor ouvert et arrêté : 300 *volts*.

Réponses : 50 *A* — 92 *A*.

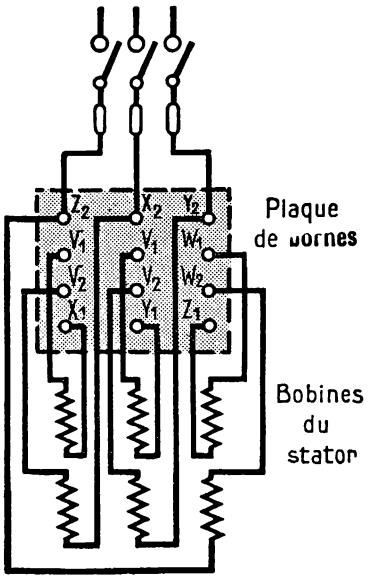


FIG. 15. — Plaques de bornes avec les entrées et sorties des bobines d'un stator tétrapolaire (exercice 3).

2. Étudier les lignes d'alimentation de l'installation force-lumière du schéma de la figure 14.

3. Le stator d'un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles à rotor en court-circuit comprend 6 bobines calculées pour une tension de 200 *volts* entre leurs extrémités. Les entrées et sorties des bobines sont amenées à la plaque de bornes (fig. 15). Le moteur peut être utilisé sous 4 tensions.

1° Indiquer le couplage des bobines pour *a)* 200-350 *volts;*— *b)* 400-700 *volts*.

2° Dessiner la plaque de bornes pour chacune des quatre tensions avec le couplage en étoile ou en triangle qui convient.

3° Pour quelles tensions le démarrage peut-il être effectué avec un coupleur étoile-triangle?

4. Peut-on employer un rhéostat de démarrage quelconque avec un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné déterminé?

Indications pour la résolution de l'exercice 2. Les déphasages du courant sur la tension ne sont pas les mêmes dans tous les circuits dérivés. Pour en tenir compte, il est commode d'utiliser le théorème de Bouchérot (36e leçon) : *dans une installation à c. a., la puissance active totale est la somme arithmétique des puissances actives partielles; la puissance réactive totale est la somme algébrique des puissances réactives partielles.*

Dans le cas d'un récepteur triphasé équilibré et de courants sinusoïdaux, les relations fondamentales concernant les puissances sont :

$$P = U.\,I.\ \sqrt{3}\cos\varphi\ (watts);\quad —\ P = U.\,I.\ \sqrt{3}\sin\varphi\ (vars);$$
$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2} = U.\,I.\ \sqrt{3}\ (VA).$$

Pour résoudre l'exercice proposé, on calculera les puissances actives, réactives, apparentes absorbées par chaque récepteur et le courant dans chaque dérivation. On calculera ensuite la puissance active, réactive et apparente de l'installation entière et le courant pris au réseau. Ne pas oublier les puissances consommées en chaleur Joule dans les lignes dérivées.

Moteurs monophasés. Moteurs synchrones.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Deux bobines de transformateur démontable, 90 spires, avec noyaux de fer.
Une petite aiguille aimantée sur pivot.
Un rotor en aluminium.
Un transformateur monophasé démontable équipé pour 115-6 volts (2 bobines de 360 spires en parallèle, 2 bobines de 9 spires en série), ou un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné fournissant du courant à basse fréquence.

LEÇON

A. — Moteurs monophasés.

Certaines installations électriques ne sont alimentées en courant alternatif que par une ligne à deux fils, soit parce qu'elles sont peu puissantes et que leur faible consommation ne justifie pas l'établissement d'une ligne à trois ou quatre fils, soit parce qu'elles sont éloignées de la zone principale de distribution et qu'une longue ligne triphasée y aboutissant serait très coûteuse. Le courant alternatif simple qu'elles reçoivent permet d'y employer des moteurs **monophasés.**

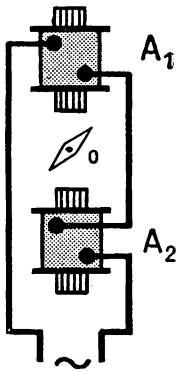


FIG. 1. — Un courant alternatif parcourant les bobines A_1 et A_2 entretient la **rotation de l'aiguille aimantée O.**

1. Une bobine parcourue par un courant alternatif monophasé crée, en un point de son axe, un champ alternatif ou deux champs tournants.

a) ***Expérience.*** — La bobine est divisée en deux parties A_1 et A_2 (fig. 1) entre lesquelles nous plaçons une petite aiguille aimantée sur un pivot.

Un courant alternatif, de préférence à basse

fréquence, parcourt la bobine : *l'aiguille aimantée vibre, mais ne tourne pas.*

Lançons-la dans un sens quelconque : *elle continue à tourner.*

Lançons-la en sens contraire : même résultat.

Donc la bobine à courant monophasé entretient dans un sens quelconque la rotation de l'aiguille aimantée. *Tout se passe comme si la bobine produisait deux champs magnétiques simultanés tournant en sens contraires.*

b) ***Explication.*** — La bobine A (fig. 2), parcourue par un courant alternatif $i = I_m \cos \omega t$, crée en un point O de son axe une induction magnétique $Ob = \mathfrak{B} \cos \omega t$, $\mathfrak{B}$ étant la valeur maximum de cette induction.

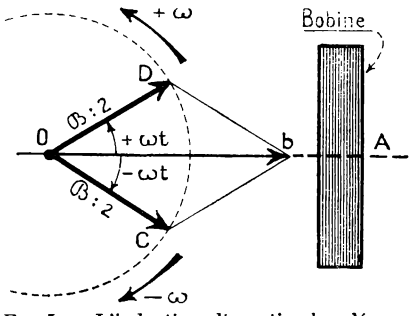


FIG. 5. — L'induction alternative *b* se décompose en deux inductions de grandeur constante tournant en sens contraires.

L'induction Ob peut être considérée comme la résultante de deux inductions OC, OD de grandeur constante $\mathfrak{B} : 2$, tournant dans le plan de la figure autour de O en sens contraires. A l'instant t, ces inductions font avec l'axe OA des angles ωt, leur résultante a bien pour valeur $\mathfrak{B} \cos \omega t$. Elles font un tour autour de O à chaque période du courant. Il est donc équivalent de dire :

la bobine A crée au point O de son axe une induction alternative,

ou bien *la bobine A crée au point O deux inductions magnétiques de grandeur constante, tournant en sens contraires à raison d'un tour par période du courant.*

2. L'un ou l'autre de ces deux champs tournants peut entraîner un rotor mobile.

a) ***Expérience.*** — Remplaçons dans le montage de la figure 1 l'aiguille aimantée par un petit rotor d'aluminium (fig. 3).

Lançons le rotor dans un sens ou dans l'autre : il continue à tourner dans ce sens.

b) ***Explication.*** — La rotation résulte, comme nous l'avons vu dans la 42e leçon, de la répulsion qu'exerce le champ tournant sur les courants qu'il induit dans le rotor.

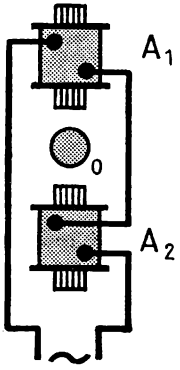


FIG. 3. — Le rotor O, lancé, continue à tourner sous l'action du courant alternatif parcourant les bobines.

Nous avons réalisé un moteur monophasé très simplifié et constaté deux de ses propriétés :

1° Il n'est *pas auto-démarreur :* pour qu'il tourne, il faut le lancer ;

2° Il n'a *pas de sens de rotation déterminé :* il continue à tourner dans le sens où il est lancé.

3. Moteurs monophasés d'induction simples.

C'est la réalisation industrielle du montage de l'expérience précédente.

a) ***Constitution.*** — Le *stator* comporte un seul enroulement, le plus souvent à quatre pôles dont les extrémités sont amenées à la plaque de bornes.

Le *rotor* est à cage d'écureuil (fig. 4).

Le moteur est donc extrêmement simple et robuste.

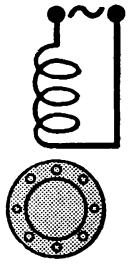


FIG. 4. — Schéma d'un moteur monophasé simple.

b) ***Propriétés.*** — Pour démarrer, on lance le moteur à la main et l'on ferme aussitôt l'interrupteur.

L'intensité de démarrage est 2,5 à 3 fois l'intensité normale.

La vitesse en charge est voisine de celle de synchronisme.

Lorsqu'on surcharge le moteur en accroissant le couple résistant, le moteur atteint son couple maximum (environ 1,35 fois le couple normal), puis il cale et s'arrête (fig. 5).

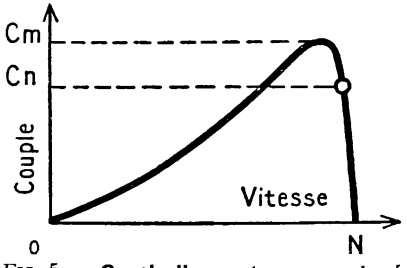


FIG. 5. — Couple d'un moteur monophasé en fonction de la vitesse du rotor.

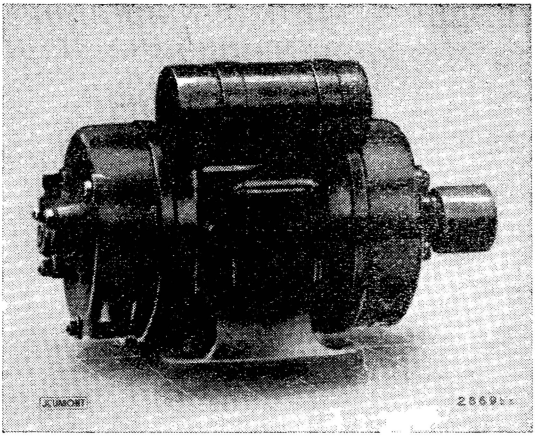
c) ***Emplois.*** — On ne fabrique guère de tels moteurs d'une puissance supérieure à un cheval. Ils sont un peu plus gros, à puissance égale, que les moteurs triphasés, de moins bon rendement, et ils calent plus facilement.

On les emploie, par exemple, pour commander les petits ventilateurs de forge, les machines à laver domestiques, le petit matériel agricole.

4. Moteurs monophasés à condensateur.

Ce sont des moteurs auto-démarreurs (fig. 6). Au démarrage, le courant monophasé est transformé en deux courants biphasés et le moteur fonctionne comme un moteur asynchrone biphasé.

On obtient (42e leçon) un ensemble de deux courants biphasés à partir d'un courant alternatif simple, en prenant, sur ce courant principal, une dérivation dans laquelle on intercale un condensateur. Le courant dérivé est déphasé en avant du courant principal.



Cliché Jeumont.

FIG. 6. — **Moteur monophasé à phase auxiliaire** avec condensateur. Le condensateur est contenu dans la boîte cylindrique fixée sur la carcasse du moteur; sa capacité est d'environ 130 *microfarads* pour un moteur de ½ *cheval* à 110 *volts*. Le disjoncteur centrifuge, logé sous un flasque, n'est pas visible.

a) ***Constitution du moteur.*** — Le *stator* possède deux enroulements :

un **enroulement principal ou de travail,** monophasé, le plus souvent tétrapolaire, relié au réseau (fig. 7);

un **enroulement auxiliaire ou de démarrage,** décalé d'un quart du pas polaire[1] par rapport à l'autre enroulement. L'enroulement auxiliaire en série avec un condensateur est branché sur le réseau au décollage. Son circuit est ouvert par un conjoncteur disjoncteur à force centrifuge lorsque la vitesse normale est atteinte.

Le *rotor* est une cage d'écureuil.

b) ***Propriétés.*** — Le moteur fonctionne pendant la mise en vitesse, d'abord sur l'arc *ab* de la courbe du couple, puis sur l'arc *bc* quand le condensateur est éliminé (fig. 8).

Le couple au décollage est 2 à

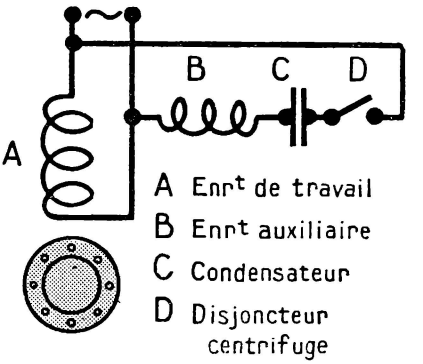


FIG. 7. — Schéma d'un **moteur monophasé avec condensateur.**

1. Rappelons que le pas polaire est l'angle entre deux pôles de même nom de l'enroulement du stator qui se suivent.

3 fois le couple normal, la pointe d'intensité atteint 3 fois l'intensité en charge normale.

Certains moteurs sont munis de deux condensateurs dont l'un reste en circuit avec la phase auxiliaire quand le démarrage est terminé (fig. 9).

On inverse le sens de rotation d'un moteur monophasé à condensateur en intervertissant les connexions, soit de l'enroulement principal, soit de l'enroulement auxiliaire.

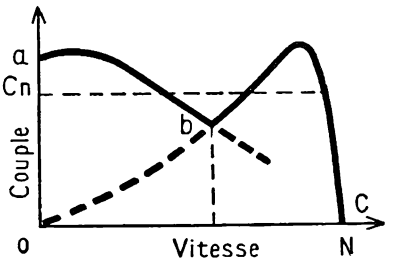


FIG. 8. — **Couple d'un moteur monophasé avec condensateur** pendant le démarrage. En *b*, le condensateur est éliminé du circuit.

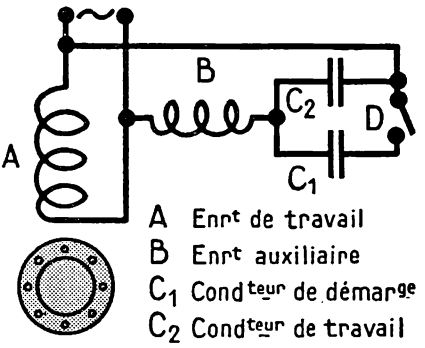


FIG. 9. — Schéma d'un **moteur à deux condensateurs** dont l'un, C_2, reste en service, ainsi que la phase auxiliaire, après le démarrage du moteur.

c) ***Emplois.*** — La plupart de ces moteurs ne dépassent pas 3 *chevaux;* mais on peut en construire de 10 à 15 *chevaux.* Ils servent aux mêmes usages que les moteurs asynchrones triphasés.

5. Moteurs à collecteur dits « universels ».

Ces moteurs sont universels parce qu'ils fonctionnent indifféremment avec du courant monophasé ou du courant continu, sous réserve que la tension d'alimentation soit la même dans les deux cas.

Vous savez qu'un moteur à courant continu, qu'il soit excité en série ou en dérivation, conserve le même sens de rotation quand on inverse le sens du courant dans la ligne d'alimentation, parce que le sens du courant est inversé à la fois dans l'inducteur et dans l'induit.

Toutefois un moteur à courant continu de fabrication ordinaire ne peut être alimenté par du courant alternatif, car son inducteur est, pour la plus grande partie, en métal massif, acier coulé ou fonte, et un courant alternatif y produirait des courants de Foucault d'une intensité excessive.

L'inducteur des moteurs *universels* est entièrement feuilleté, comme

l'induit (fig. 10). Le moteur est excité, soit en série, soit en dérivation.

Il est à peu près impossible d'éviter des étincelles au collecteur, aussi sont-ils de faible puissance, une fraction de cheval.

Leur vitesse, qui ne dépend pas de la fréquence du courant, peut dépasser 3 000 *tours par minute* et aller jusqu'à 6 000 *tours par minute* et davantage.

On les démarre directement, en fermant un simple interrupteur, souvent sans rhéostat.

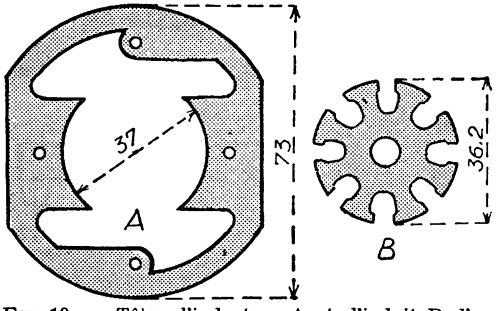


FIG. 10. — Tôles d'inducteur A et d'induit B d'un **moteur universel** de 50 *watts*, 110 *volts*. L'inducteur et l'induit ont une épaisseur de 15 *millimètres*. Le collecteur compte 8 lames.

Les moteurs universels sont très employés à cause de leur petite taille. Les moteurs des outils tournants portatifs, tels que les perceuses électriques, sont universels. C'est avec ces moteurs que l'on équipe la plupart des appareils ménagers : petits ventilateurs, aspirateurs de poussières, cireuses, machines à coudre, rasoirs électriques, sèche-cheveux, etc...

B. — Moteurs synchrones.

6. Ce sont des alternateurs fonctionnant comme moteurs.

Le *stator* est alimenté par des courants triphasés qui créent des champs tournants. L'*inducteur*, excité par du courant continu, et préalablement lancé, tourne rigoureusement à la vitesse de synchronisme. C'est la transposition à l'échelle industrielle de l'appareil et de l'expérience de la figure 7 de la 43e leçon.

7. Démarrage d'un moteur synchrone.

Démarrer un moteur synchrone triphasé avec le courant du réseau est une opération assez délicate. Il faut, en effet, réaliser les conditions suivantes :

1° Amener l'inducteur au synchronisme; on se sert souvent d'un moteur asynchrone auxiliaire;

2° Régler la f. c. é. m. du moteur à peu près à la valeur de la tension du réseau;

3° Mettre la tension du moteur synchrone en concordance de phase avec celle du réseau;

4° Vérifier que les phases de la ligne et du moteur se correspondent dans le même ordre.

La figure 11 représente un montage de lampes pour la vérification des conditions 1, 3 et 4.

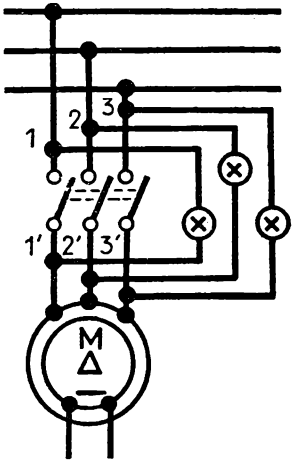


FIG. 11. — Montage pour vérifier que les conditions de démarrage d'un moteur synchrone triphasé sont réalisées.

8. Usages des moteurs synchrones.

Les moteurs synchrones sont, en général, des machines puissantes ; ils ne sont guère employés que dans des installations importantes.

Quand leur inducteur est très fortement excité, outre de l'énergie mécanique ils produisent de l'énergie réactive qui améliore le facteur de puissance des installations dont ils font partie.

Pour cet usage, on leur préfère parfois des moteurs asynchrones dans le rotor desquels on envoie du courant continu quand le démarrage est effectué : on nomme ces moteurs *moteurs asynchrones synchronisés.*

RÉSUMÉ

1. — Des *moteurs monophasés*, en général de faible puissance, sont employés dans les installations alimentées par du courant alternatif.

Certains, du type asynchrone, doivent, pour démarrer, être lancés à la main dans le sens de rotation désiré.

D'autres sont munis d'une phase auxiliaire contenant un condensateur. Ils sont *auto-démarreurs*. Dans quelques modèles, un second condensateur avec la phase auxiliaire reste en circuit pendant la marche normale du moteur.

2. — Les *moteurs universels*, qui équipent beaucoup d'appareils domestiques, fonctionnent indifféremment sous tension alternative ou sous tension continue.

3. — Les *moteurs synchrones* sont des alternateurs employés comme moteurs. Ils tournent à la vitesse de synchronisme. Leur démarrage est peu commode.

EXERCICES

1. La puissance d'un moteur universel commandant une machine à coudre est de 1/6 *cheval*. Le rendement est 0,60. Calculer la dépense horaire de fonctionnement d'un tel moteur quand le *kWh* est payé 0,3 F.

2. Un moteur monophasé absorbe 5 *ampères* sous 115 *volts*. Son *cos* φ est 0,80 et son rendement 0,75. Quelle est sa puissance exprimée en chevaux?

Réponse : 0,46 *chevaux.*

3. *Un moteur asynchrone triphasé de* 6 chevaux *a été construit pour fonctionner sous* 220 volts, *on l'emploie sous* 190 volts. *Comment se comporte-t-il?*

Sa puissance est proportionnelle au carré de la tension.

4. *Qu'arrive-t-il si l'une des trois phases d'un moteur asynchrone triphasé est coupée pendant le fonctionnement du moteur?*

Le moteur continue à tourner comme un moteur monophasé. Son rendement et son cos φ sont diminués. L'intensité absorbée est plus grande et atteint en charge une valeur dangereuse pour les enroulements du moteur.

5. *Qu'arrive-t-il si l'une des phases du rotor d'un moteur asynchrone triphasé est coupée en marche?*

Si le moteur est à vide ou peu chargé, il continue à tourner à la même vitesse. A pleine charge, la vitesse tombe à moitié de la vitesse normale et reste alors constante, même si la charge vient à diminuer. Le rendement et le facteur de puissance sont alors mauvais.

6. *Comment se comporte un moteur construit pour* 50 p/s *si on l'alimente à* 40 p/s?

La vitesse diminue proportionnellement à la fréquence.

Le flux augmente dans le moteur, le courant à vide croît, le couple et le courant en charge augmentent

7. 1re *Question.* — Une dynamo alimente un moteur à courant continu par l'intermédiaire d'une ligne en cuivre de 200 mètres de longueur. La force électromotrice de la dynamo est de 126 volts. La résistance intérieure de la dynamo est de 0,05 ohm; celle du moteur de 0,1 ohm, l'intensité du courant fourni par la dynamo est de 120 ampères, et la résistance du cuivre = 1,8 microhm-cm.

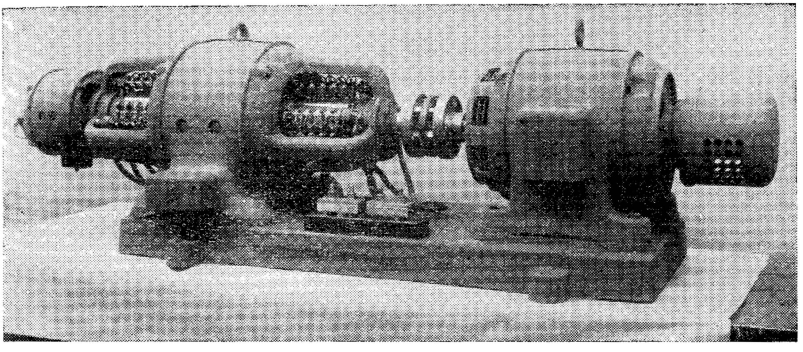
La chute de tension en ligne étant fixée à 5 % de la tension aux bornes de la dynamo, on demande :

1° La tension aux bornes de la dynamo.
2° La résistance en ohms de la ligne.
3° La section du conducteur de la ligne.
4° La tension aux bornes du moteur.
5° La force contre-électromotrice du moteur.
6° Le rendement électrique du moteur.

2e *Question.* — Un moteur triphasé tétrapolaire absorbe sous 200 volts, 50 périodes par seconde, un courant d'intensité 50 ampères et une puissance de 14705 watts. Son rendement est de 0,88. Calculer :

1° La puissance apparente absorbée par le moteur.
2° Son facteur de puissance.
3° La puissance utile en watts et en chevaux-vapeur.
4° La vitesse du champ tournant du moteur et la vitesse en charge sachant que le glissement est de 4 %.

Examen du C. A. P. (Électricien-monteur, Électricien-bobineur, Plateforme d'essais). - 1950. Les deux questions sont obligatoires.



Cliché Constructions électriques, Nancy.

FIG. 1. — **Groupe convertisseur** pour nickelage. Il se compose :
à *droite*, d'un **moteur asynchrone triphasé**, 20 *ch*, 960 *t/mn*, à rotor bobiné dont les bagues sont protégées par un capot.
à *gauche*, d'une **dynamo à basse tension**, 12 *V*, 800 *A*. A cause de la grande intensité du courant débité, on a construit la dynamo avec deux collecteurs de grande largeur. Pour faciliter le réglage de la tension, la génératrice est à excitation séparée ; l'excitatrice est en bout d'arbre à gauche, elle fournit 100 *V*.

Transformation de courants alternatifs en courant continu.

MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

Le dispositif de recharge des batteries d'accumulateurs que l'on possède.

LEÇON

1. Groupes moteurs-générateurs.

Un moteur à courant alternatif, souvent asynchrone triphasé, et une dynamo shunt ou compound sont montés, les arbres dans le prolongement

l'un de l'autre, sur un socle commun et accouplés par un manchon semi-élastique (fig. 1).

Le groupe reçoit de l'énergie électrique sous forme de courants alternatifs et la restitue, moins quelques pertes, sous forme de courant continu.

L'avantage de ce dispositif est l'indépendance complète au point de vue électrique du moteur et de la génératrice.

Mais le rendement d'un groupe générateur n'est pas très élevé parce qu'il est égal au produit des rendements des deux machines accouplées.

2. Commutatrices.

Ce sont des machines qui sont à la fois dynamos et alternateurs.

Par exemple, soit une *dynamo bipolaire*, que la figure 2 représente schématiquement du côté opposé au collecteur. Deux points A et B diamétralement opposés de l'enroulement induit sont connectés à deux bagues isolées fixées sur l'arbre. La tension entre bagues est maximum et égale à la f. é. m. E de la dynamo quand la ligne AB se trouve en XY, elle passe ensuite par les valeurs *zéro*, — E, *zéro* et revient à + E, et ainsi de suite. Elle est donc alternative et sa période est égale à la durée d'un tour; elle est même à peu près sinusoïdale et sa valeur efficace est E : $\sqrt{2}$. On collecte cette tension par deux frotteurs appuyant sur les bagues.

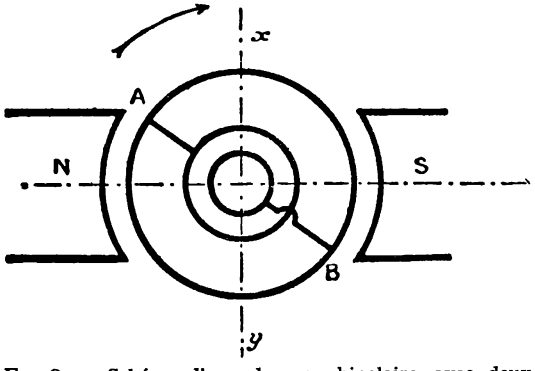


FIG. 2. — Schéma d'une dynamo bipolaire avec deux prises diamétralement opposées sur l'induit et deux bagues sur l'arbre.

En réunissant trois points à 120° de l'induit à trois bagues isolées calées sur l'arbre (fig. 3), on obtient des tensions triphasées de valeur efficace.

$$\frac{E}{\sqrt{2}} \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}612E.$$

Il est possible de faire des prises analogues sur l'induit d'une dynamo multipolaire.

Si l'on commande une telle dynamo à trois bagues par un moteur mécanique, elle fournit du courant continu par les balais de son collecteur et des courants triphasés par les frotteurs de ses bagues.

En l'alimentant par du courant continu comme un moteur à courant continu, elle produit des courants triphasés.

En lui fournissant des courants triphasés comme à un moteur synchrone, on obtient aux balais du courant continu. C'est dans ce dernier rôle qu'on la nomme **commutatrice.**

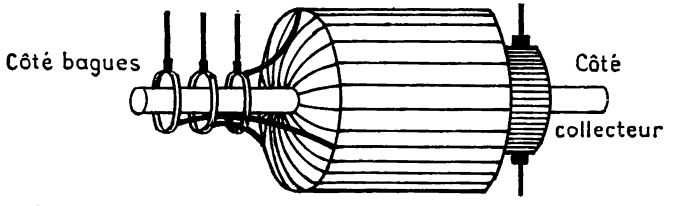


FIG. 3. — **Induit de commutatrice** bipolaire avec trois bagues sur l'arbre.

La f. é. m. continue E et la tension triphasée U sont liées par la relation

$$U = 0{,}612\ E.$$

Par exemple, pour obtenir une f. é. m. continue de 114 *volts*, il faudra utiliser une tension triphasée de

$$U = 0{,}612 \times 114 = 70 \text{ volts.}$$

Pour alimenter la commutatrice à partir du secteur triphasé public dont la tension entre phase est en général 200 *volts*, un transformateur triphasé 200—70 *volts* est indispensable.

On démarre une commutatrice comme un moteur synchrone.

3. Redresseurs secs.

Ce sont les redresseurs cuproxyde et les redresseurs sélénofer.

a) ***Redresseur cuivre-oxyde de cuivre.*** — Il se compose d'une série de **rondelles.** Une *rondelle* est une plaque de cuivre pur recouverte sur une face d'oxyde cuivreux OCu_2 (fig. 4).

La résistance électrique d'une rondelle est faible dans le sens oxyde-cuivre et grande dans le sens cuivre-oxyde. Aussi, quand on soumet une rondelle à une tension alternative, ne laisse-t-elle passer que les alternances du courant qui sont d'un certain sens et arrête-t-elle les autres. Elle est en

réalité une *soupape* plutôt qu'un redresseur : le courant qui la traverse est interrompu, ondulé, mais toujours de même sens (fig. 5).

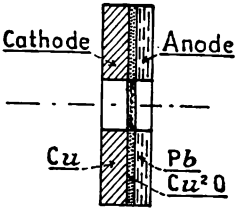


FIG. 4. — Schéma d'une **rondelle** redresseuse, cuivre-oxyde cuivreux.

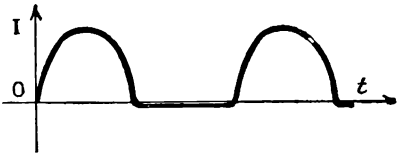


FIG. 5. — Courbe de l'intensité d'un **courant redressé** par une rondelle : une alternance du courant alternatif est supprimée à chaque période.

Une rondelle peut supporter 5 volts et une densité de courant de 0,1 *ampère par centimètre carré.*

Pour constituer un **élément redresseur,** on empile le nombre de rondelles nécessaires pour la tension à redresser, en les séparant par des plaques de plomb pour obtenir un bon contact et des feuilles de tôle qui augmentent la surface de refroidissement (fig. 6).

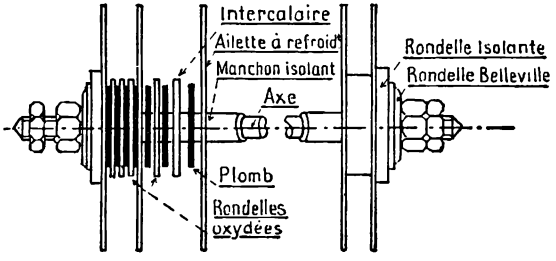


FIG. 6.
Schéma de la constitution d'un **élément redresseur.**

Plusieurs éléments sont montés en parallèle si l'intensité du courant l'exige.

Des éléments peuvent être disposés pour redresser les deux alternances du courant (fig. 7).

Un poste redresseur comprend, en général, un transformateur pour fournir la tension désirée. Le rendement total est de 70 %, environ.

b) ***Redresseur sélénofer.*** — Il ne diffère d'un redresseur cuproxyde que par la nature des *rondelles.* Une rondelle sélénofer est un disque de fer nickelé couvert d'une couche de sélénium [1] sur l'une de ses faces. Le courant passe dans le sens fer-sélénium.

1. Le sélénium est un métalloïde de la famille du soufre. Des séléniures sont mélangés en petite quantité aux sulfures naturels.

c) ***Usages.*** — Les redresseurs secs sont robustes et n'exigent aucun entretien.

De très nombreux, de faible puissance, servent à charger des batteries transportables d'accumulateurs. On en construit de plusieurs

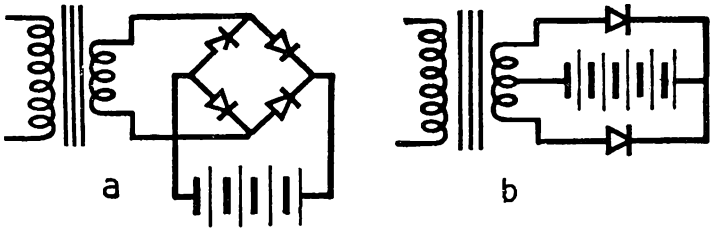


FIG. 7. — Deux montages pour redresser les deux alternances d'un courant alternatif : *a*) en pont de Wheatstone, *b*) en bivalve.
Remarquer le symbole d'un élément redresseur : le courant passe dans le sens des pointes triangulaires.

kilowatts pour alimenter des Centraux téléphoniques, des installations de galvanoplastie, des postes de soudure à l'arc. De tout petits redresseurs secs, logés dans les boîtiers d'ampèremètres et de voltmètres à cadre mobile et aimant, rendent ces instruments capables de mesurer les intensités et les tensions alternatives.

4. Kénotrons et lampes Tungar.

Un **kénotron** (fig. 8) ressemble un peu à certaines lampes de T.S.F. Il se compose d'une grosse ampoule en verre dans laquelle est fait un vide aussi parfait que possible; l'ampoule contient un filament de tungstène chauffé au rouge par quelques éléments d'accumulateurs, c'est la *cathode*, et une plaque de métal qui entoure le filament, c'est l'*anode*.

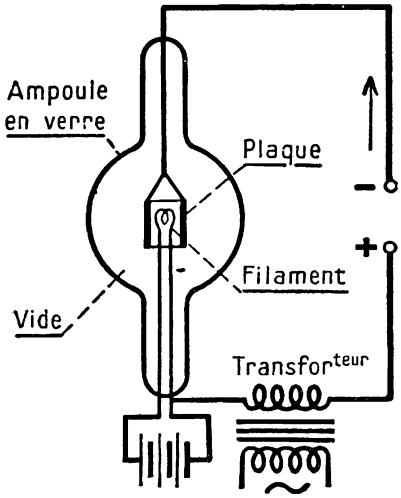


FIG. 8. — Schéma d'un **kénotron.**

En appliquant une tension alternative entre l'anode et la cathode, le kénotron laisse passer seulement les alternances du courant allant de la plaque au filament.

Les kénotrons sont surtout construits pour des tensions très élevées, de plusieurs milliers de volts; il en est dont la puissance atteint plusieurs dizaines de kilowatts.

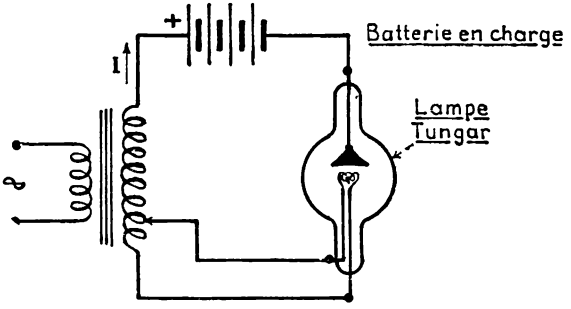


FIG. 9. — Charge d'une batterie d'accumulateurs avec une **lampe Tungar.**

La **lampe Tungar** est un redresseur plus usuel (fig. 9). Elle diffère d'un kénotron par la présence dans l'ampoule d'un peu d'argon. L'anode est une plaque de graphite; la cathode, un filament de tungstène chauffé au rouge.

Les lampes Tungar servent surtout à la charge des accumulateurs sur secteur alternatif.

5. Redresseurs à vapeur de mercure.

Ce sont des redresseurs industriels. Certains ont une puissance de 12 000 *kilowatts.*

a) ***Redresseurs à ampoule de verre.*** — La figure 10 en est le schéma. L'ampoule en verre Pyrex est vide d'air. Elle est munie d'une cathode de mercure à la partie inférieure, et, plus haut, de deux anodes en fer, une troisième anode, plus petite, très près de la cathode, sert à l'allumage de l'ampoule. Le courant alternatif à redresser est amené à l'appareil comme l'indique la figure.

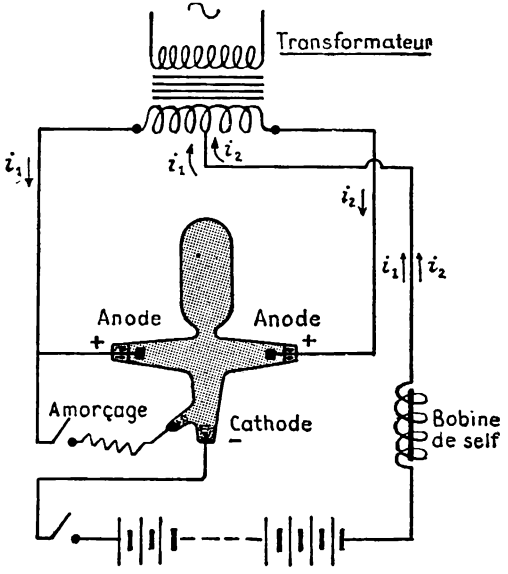


FIG. 10. — Charge d'une batterie d'accumulateurs avec un **redresseur à vapeur de mercure.**

On « allume » l'ampoule en l'inclinant pour que jaillisse une étincelle entre l'anode d'allumage et le mercure de la cathode. L'ampoule ramenée à la verticale, le courant continue à passer dans le sens anode-cathode, les deux alternances sont utilisées.

Avec une ampoule à six anodes, on redresse à la fois les trois phases d'un ensemble de courants triphasés, et le courant obtenu n'est que peu ondulé (fig. 11).

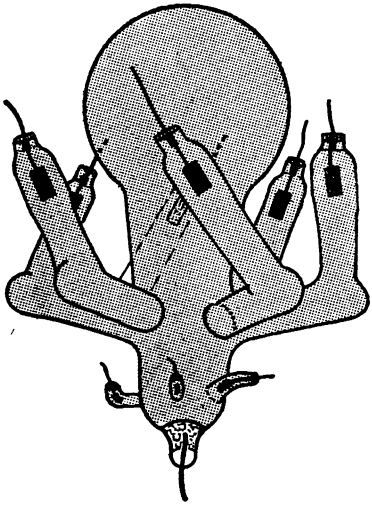


FIG. 11. — **Redresseur à vapeur de mercure** à ampoule de verre avec six grosses anodes. L'ampoule est haute de 80 *centimètres*.

On emploie de tels redresseurs pour des installations de moyenne puissance, inférieure, par exemple, à 200 *kilowatts*, avec une tension au plus de 600 *volts*.

b) ***Redresseurs à enveloppe métallique.*** — Ils servent pour des puissances et des tensions plus grandes.

Ils sont construits en acier et fonctionnent de la même façon que les redresseurs en verre.

Ils sont d'apparence plus compliqués (fig. 12) parce qu'ils sont pourvus d'un dispositif de refroidissement par courant d'eau et d'une pompe à gaz à fonctionnement automatique, qui entretient dans la cuve un vide d'environ un millième de millimètre de mercure.

RÉSUMÉ

Les appareils qui servent à transformer les courants alternatifs en courant continu sont nombreux et de principes différents.

1. — Un *groupe moteur-générateur* se compose d'un moteur asynchrone triphasé et d'une dynamo shunt ou compound.

Les *commutatrices*, qui ressemblent beaucoup à des dynamos, sont à la fois des dynamos et des alternateurs.

2. Les *redresseurs secs*, cuivre-oxyde cuivreux ou sélénium-fer, sont très commodes pour la charge des batteries d'accumulateurs sur secteur alternatif.

3. — Les *kénotrons* et les *lampes Tungar* fonctionnent comme certaines lampes de T. S. F.

4. — *Les redresseurs à vapeur de mercure* à ampoules de verre ou à enveloppes métalliques sont de puissants redresseurs industriels.

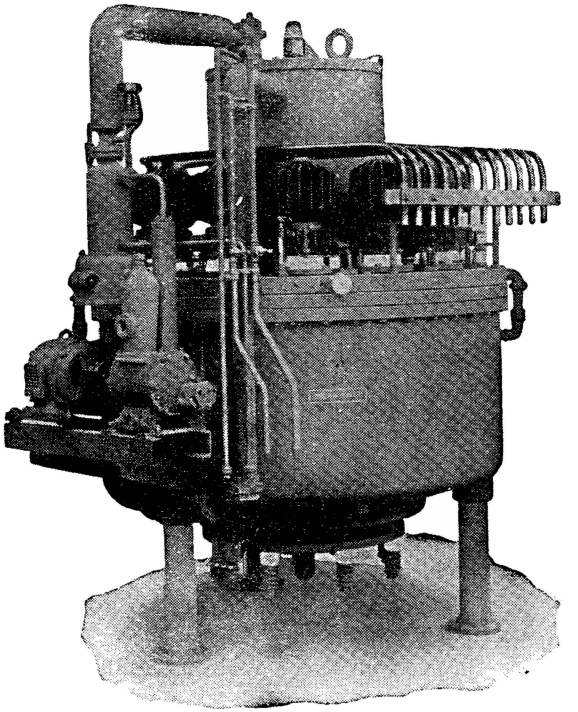


Fig. 12. — Redresseur à vapeur de mercure à cuve métallique.

EXERCICES

1. On a besoin d'une puissance de 50 *kW* en courant continu 550 *V*. Le secteur de distribution d'énergie électrique peut fournir du courant triphasé à 50 *p/s* sous la tension de 15 000 *volts* entre phases.

Donner la liste, avec leurs spécifications, des machines nécessaires dans le cas où l'on emploie :

1° un groupe moteur-générateur,

2° une commutatrice.

2. On charge une batterie d'accumulateurs de 6 éléments de 40 *ampères-heures* avec un redresseur sec dont le rendement global est 0,60. Quel est le coût de la charge quand le *kWh* est payé 0,3 F ?

3e PARTIE

COMPLÉMENTS

Mesure des principales grandeurs électriques.

A. — Mesure de l'intensité d'un courant.

I° Continu.

Les ampèremètres les plus employés sont ou à cadre mobile et aimant ou électromagnétiques. Ils sont munis de shunts extérieurs (fig. 1).

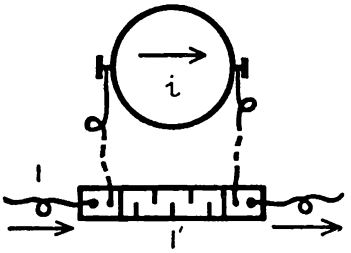


FIG. 1. — Schéma d'un **ampèremètre avec shunt.** Le courant total I est la somme du courant I' dans le shunt et du courant *i* dans le milliampèremètre. L'ampèremètre indique le courant total.

Le *courant total* à mesurer I se partage en un *courant dérivé* *i* dans l'appareil de lecture et en un *courant d'échauffement* I' dans le shunt :

$$I = i + I'.$$

1. Ampèremètres à cadre mobile et aimant.

L'appareil de lecture est un milliampèremètre dont l'échelle porte 100 divisions équidistantes.

Il en existe de deux types différant par le courant dérivé *i* nécessaire pour que l'aiguille dévie de toute l'échelle :

pour l'un, il faut $i = 0{,}01$ *ampère*; la résistance du milliampèremètre, y compris celle des cordons de liaison au shunt, est réglée à 10 *ohms;*

pour l'autre, il faut $i = 0{,}1$ *ampère* et la résistance est réglée à 1 *ohm.*

Dans les deux cas, la tension entre les deux bornes du shunt pour la déviation totale de l'aiguille est :

$$10 \times 0{,}01 = 1 \times 0{,}1 = 0{,}1 \text{ } \textit{volt.}$$

Le courant total I correspondant à cette déviation totale se nomme le **calibre** de l'ampèremètre ou du shunt.

On construit des shunts pour les calibres de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100

...*ampères;* ils sont tarés, c'est-à-dire étalonnés, soit pour 0,1 *volt* et 0,01 *ampère*, soit pour 0,1 *volt* et 0,1 *ampère*.

Par exemple, le shunt de 10 *A*, 0,1 *V*, 0,01 *A* a pour résistance, puisque le courant dans le shunt pour le calibre 10 *ampères* est 9,99 *ampères :*

$$R = 0{,}1 : 9{,}99 = 10\,010 \text{ microhms};$$

la résistance du shunt de 10*A*, 0,1 *V;* 0,1*A* a pour résistance :

$$R' = 0{,}1 : 9{,}9 = 10\,101 \text{ microhms}.$$

Les shunts de même calibre pour 0,1 volt sont pratiquement interchangeables à partir de 20 *ampères*, que le maximum du courant dérivé soit 0,01 ou 0,1 *ampère*.

Le calibre, la tension de tarage, la résistance sont poinçonnés sur le shunt. Sur un shunt de 50 *ampères*, on lit :

$$50\ A\ —\ 0{,}1\ V\ —\ R = 2\,004 \text{ microhms}.$$

Avec un ampèremètre de contrôle à cadre mobile et aimant, en bon état, on mesure l'intensité d'un courant avec une erreur en plus ou en moins inférieure à 1 % du calibre employé. La mesure est donc d'autant plus précise que le calibre du shunt est plus petit.

2. Ampèremètres électromagnétiques.

Ils sont moins sensibles que les précédents. Leur échelle est resserrée dans son premier cinquième et inutilisable dans cette région.

L'appareil de lecture est un ampèremètre du calibre de 10 *ampères* taré à 0,3 *volt* à ses bornes.

La résistance des shunts de 0,3 *volt* est ajustée en tenant compte d'une intensité dérivée de 10 *ampères*. Par exemple, pour un calibre de 50 *ampères*, le courant d'échauffement est seulement 40 *ampères* et la résistance du shunt est

$$0{,}3 : 40 = 7\,500 \text{ microhms}.$$

2° Alternatif.

3. Pour mesurer les grands courants, on emploie des transformateurs de courant.

Vous savez qu'un ampèremètre électromagnétique possède une bobine magnétisante relativement volumineuse et dont l'auto-induction n'est pas négligeable. L'impédance de cette bobine varie donc dans le même sens que la fréquence du courant. Quand la bobine ampèremètrique est en dérivation sur un shunt déterminé, le courant dérivé décroît

quand la fréquence augmente. C'est pourquoi l'on n'emploie pas de shunts avec les ampèremètres électromagnétiques pour mesurer les courants alternatifs.

On se sert de **transformateurs de courants.** Ce sont de petits transformateurs monophasés construits pour que le courant secondaire soit, dans les conditions d'emploi, inférieur et pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasé par rapport à celui-ci d'un angle voisin de zéro degré.

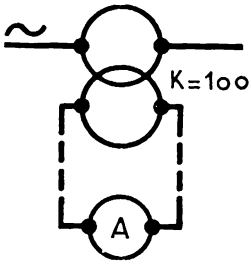


FIG. 2. — Emploi d'un **transformateur de courant** avec un ampèremètre à courant alternatif.

Le primaire est monté en série dans le circuit où l'on veut mesurer le courant, tandis que le secondaire est fermé sur un ampèremètre quelconque pour courant alternatif (fig. 2).

Le courant maximal prévu au secondaire est le plus souvent $I_2 = 10$ *ampères.* Le maximum du courant primaire est $I_1 = 50$ ou 100 — 500 — 1 000 etc. *ampères.* Le rapport de transformation qui est :

$$K = I_1/I_2, \text{ soit } 50/10, \text{ ou } 100/10 \text{ ou } 500/10, \text{ etc...,}$$

est inscrit sur l'appareil.

Notez qu'**un transformateur de courant ne doit jamais fonctionner avec le secondaire ouvert.** Il a été calculé et construit pour un secondaire fermé sur la faible résistance d'un ampèremètre. Quand le secondaire est ouvert, la tension entre ses bornes s'élève dangereusement pour l'appareil et l'opérateur.

B. — Mesure d'une tension électrique.

1° Continue.

4. Les voltmètres très résistants sont préférables aux autres.

Ils sont traversés par un courant très faible qui ne modifie pas sensiblement l'état électrique des circuits dans lesquels ils sont montés en dérivation.

On emploie surtout des voltmètres à cadre mobile et aimant dont la résistance est de l'ordre de 1 000 *ohms* par *volt.*

Ils possèdent souvent plusieurs sensibilités ou calibres de mesure,

par exemple 3 — 7,5 — 30 — 150 — 300 — 750 *volts*, pour une même échelle de 150 divisions équidistantes.

La résistance des voltmètres pour leur calibre le plus élevé est inscrite sur le cadran.

2° Alternative.

5. Moyennes tensions.

Les voltmètres employés sont électromagnétiques, à plusieurs calibres : 15 — 30 — 150 — 300 *volts* avec une échelle de 150 divisions peu utilisable dans son cinquième inférieur.

6. Tensions élevées.

On ajoute au voltmètre un *transformateur de tension.*

C'est un petit transformateur monophasé construit pour que la tension secondaire soit inférieure et, dans les conditions d'emploi, pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro degré.

Le secondaire est en général prévu pour $U_2 = 150$ *volts*, le primaire pour la tension U_1 la plus élevée que l'on peut avoir à mesurer. Le rapport de transformation $K = U_1/U_2$ est poinçonné sur l'appareil, par exemple K = 15 000/150.

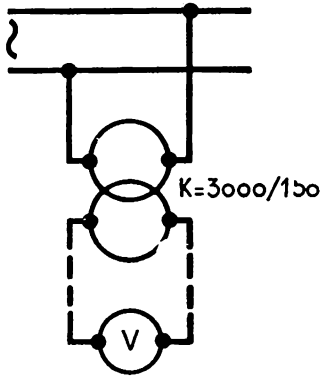


FIG. 3. — Emploi d'un **transformateur de tension** avec un voltmètre à courant alternatif.

Le primaire est branché en dérivation aux bornes entre lesquelles on mesure la tension et le secondaire sur un voltmètre électromagnétique quelconque (fig. 3).

Un *transformateur de tension* peut rester branché sans inconvénient le secondaire étant ouvert.

EXERCICES

1. On possède un milliampèremètre dont le calibre est 0,01 *ampère*, sa résistance entre bornes est 10 *ohms*, l'échelle porte 100 divisions. Calculer :

1° la résistance du shunt qui en fera un ampèremètre du calibre de 100 *ampères;*

2° la résistance à lui ajouter en série pour en faire un voltmètre du calibre de 250 *volts.*

Réponses : 1 000 *microhms* — 24 990 *ohms.*

2. Avec un milliampèremètre de calibre 0,1 *ampère*, taré pour 0,1 *volt*, dont l'échelle a 100 divisions, on a employé par mégarde pour une mesure de courant un shunt de 50 *ampères*, 0,3 *volt*, taré pour un courant dérivé de 10 *ampères*. L'aiguille a dévié de 80 divisions. Calculer le courant mesuré.

Indications pour la solution. On calculera d'abord le courant dans le milliampèremètre, puis la tension entre ses bornes qui sont aussi celles du shunt. Puis on calculera la résistance du shunt et le courant qui le traverse. D'où le courant total.

Réponse : 10,74 *ampères.*

3. Dans une installation à courant alternatif, on mesure :

1° l'intensité débitée dans un fil de ligne en utilisant un transformateur de courant dont le rapport de transformation est $K = 500/10$ et un ampèremètre électromagnétique de calibre 5 *ampères* dont l'échelle porte 100 divisions;

2° la tension entre deux fils de ligne en se servant d'un transformateur de tension dont le rapport de transformation est $K = 15\ 000/150$ et d'un voltmètre électromagnétique de calibre 300 *volts* avec échelle de 150 divisions.

L'aiguille de l'ampèremètre s'arrête à la division 90, celle du voltmètre à la division 65. Quels sont le courant et la tension mesurés?

Réponse : 225 *A;* — 13 000 *V.*

4. Une dynamo compound, dont la f. é. m., dans les conditions d'emploi, est 130 *V*, fournit du courant dans le circuit extérieur sous la tension de 114 *V*. La résistance de l'induit est 0,4 Ω; celle de l'enroulement série, 0,25 Ω, et celle de l'enroulement shunt, 120 Ω. Calculer :

1° la puissance fournie au circuit extérieur;

2° l'ensemble des pertes magnétiques et mécaniques, sachant que le rendement est 0,80.

Réponses : 2736 *W;* — 170 *W.*

5. Un groupe moteur-générateur se compose d'un moteur asynchrone triphasé, qui, alimenté sous 220 *V*, fréquence 50 H_2, appelle un courant de 30 *A* avec un facteur de puissance de 0,80, et d'une génératrice à c. c. qui débite un courant de 50 *A* sous une tension de 120 *V*. Calculer :

a) le rendement du groupe;

b) les rendements de chacune des machines supposés égaux pour la charge considérée;

c) le moment du couple transmis par le manchon d'accouplement, sachant que le moteur d'induction est tétrapolaire et que son glissement, dans les conditions du problème, est 0,04.

Réponses : 0,72; — 0,85; — C = 4,8 m.kg.

Mesure des principales grandeurs électriques (suite).

C. — Mesure des résistances électriques.

On mesure une résistance avec du courant continu. L'emploi de courant alternatif fournirait l'impédance de la portion de circuit étudiée. L'impédance varie avec la fréquence du courant, elle est parfois bien supérieure à la résistance.

1. Mesure d'une résistance moyenne (de quelques centièmes à quelques centaines d'ohms).

On fait passer dans la résistance un courant I que l'on mesure avec un ampèremètre, on mesure avec un voltmètre la tension U entre les bornes de la résistance et l'on applique la formule d'Ohm :

$$R = U : I.$$

Appareils de mesure et résistance sont disposés comme l'indique la figure 1. Le rhéostat permet d'obtenir plusieurs valeurs du courant pour effectuer plusieurs mesures de la résistance. On prend la moyenne arithmétique des résultats obtenus. Cette façon de procéder renseigne sur la précision des mesures.

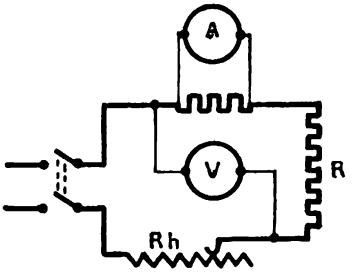


FIG. 1. — **Mesure d'une résistance avec un ampèremètre et un voltmètre.**

Les valeurs extrêmes des résistances qu'il est possible de mesurer ainsi dépendent des instruments de mesure, de la tension et du courant dont on dispose.

2. Mesure d'une faible résistance.

On compare la résistance à mesurer à une résistance connue du même ordre de grandeur, par exemple à celle d'un shunt d'ampèremètre.

La résistance à mesurer x et un shunt d'ampèremètre de résistance s sont montés en série (fig. 2). On les fait traverser par un courant dont il est inutile de mesurer le courant I. On branche un même milliampèremètre successivement aux bornes de x et de s. Soient n et n' les déviations de l'aiguille. Ces déviations sont proportionnelles aux chutes de tension xI et sI dans x et dans s; donc :

$$\frac{xI}{sI} = \frac{n}{n'} \quad \text{et} \quad x = s \times \frac{n}{n'}.$$

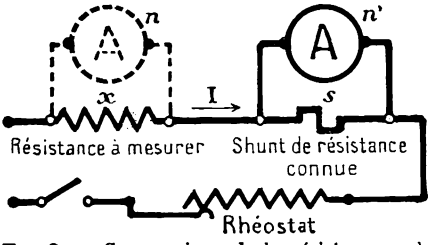


FIG. 2. — Comparaison de la résistance x à la résistance s d'un **shunt d'ampèremètre.**

Exemple.

Soient 2 004 *microhms* la résistance du shunt, $n = 120$ l'indication de l'aiguille du milliampèremètre aux bornes de x, $n' = 96$ aux bornes de s :

$$x = 2\,004 \times \frac{120}{96} = 2\,505 \text{ microhms.}$$

3. Mesure d'une grande résistance.

Il s'agit d'une résistance x de plusieurs milliers d'ohms. On la compare à la résistance connue R d'un voltmètre.

On dispose d'une source de courant dont la tension, voisine du calibre du voltmètre, reste invariable pendant la mesure.

On branche d'abord le voltmètre aux bornes de la source, il dévie jusqu'à la division n_1 : la tension de la source est n_1 *volts* (fig. 3).

On monte *en série*, sous cette tension, la résistance à mesurer x et le voltmètre de résistance R, l'aiguille dévie jusqu'à la division n_2 : la tension entre les bornes du voltmètre est n_2 *volts*.

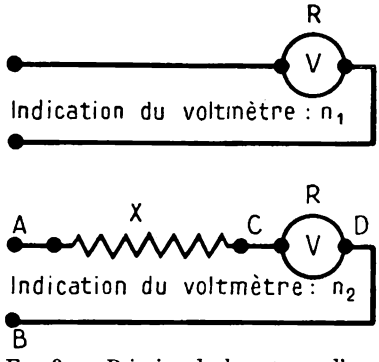


FIG. 3. — Principe de la mesure d'une **grande résistance** avec un voltmètre.

Soit i l'intensité du courant dans le second montage :

1° dans le circuit ACDB

$$i = \frac{n_1}{x + R}.$$

2° dans la portion de circuit CD

$$i = \frac{n_2}{R}.$$

Donc : $\frac{n_1}{x + R} = \frac{n_2}{R}$.

En résolvant cette équation, on trouve :

$$x = R\,\frac{n_1 - n_2}{n_2}.$$

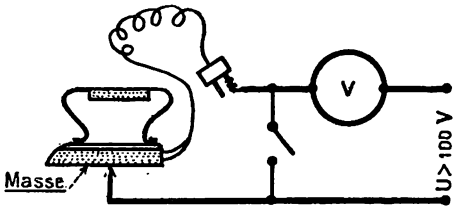


FIG. 4. — Mesure de la **résistance d'isolement** d'un fer à repasser électrique. L'interrupteur permet de passer de l'un des montages de la figure 3 à l'autre sans débranchement.

Exemple.

Mesure de la résistance d'isolement par rapport à la masse d'un fer à repasser électrique.

Le voltmètre employé a une résistance de 150 000 *ohms*.
Les appareils sont montés comme l'indique la figure 4.
Les résultats des lectures sont :

$$n_1 = 117, \qquad n_2 = 13.$$

Donc :
$$x = 150\,000 \times \frac{117 - 13}{13}$$
$$= 1\,200\,000 \text{ } \textit{ohms}, \text{ soit } 1{,}2 \text{ } \textit{mégohm}.$$

La résistance d'isolement d'un appareil ménager doit être au moins 1 *mégohm*.

4. Mesure des résistances d'isolement d'une installation électrique.

Rappelons que ces résistances sont :

1° la résistance entre les deux conducteurs de l'installation, lampes et récepteurs enlevés, interrupteurs enclenchés, mesurée pour chaque partie de l'installation comprise entre deux coupe-circuit successifs ou placée après le dernier coupe-circuit;

2° la résistance entre conducteurs et terre, récepteurs et interrupteurs enclenchés; le neutre à la terre, s'il existe, est provisoirement déconnecté de la terre pendant la mesure.

Elles doivent être mesurées à l'aide de courant continu sous la tension d'au moins 500 volts.

La résistance d'isolement de toute partie d'installation, soit entre conducteurs, soit entre un conducteur quelconque et la terre, doit être au moins égale à 250 000 ohms.

L'appareil le plus commode pour la mesure des résistances d'isolement est l'**ohmmètre à magnéto.**

Il se compose d'une *magnéto*[1] mue à la main avec une manivelle et d'un ensemble de *deux cadres galvanométriques.* Ces deux cadres mobiles de même axe sont perpendiculaires et fixés l'un à l'autre. Ils sont montés sur pivots dans le champ d'un fort aimant sans ressorts spiraux de rappel au zéro (fig. 5).

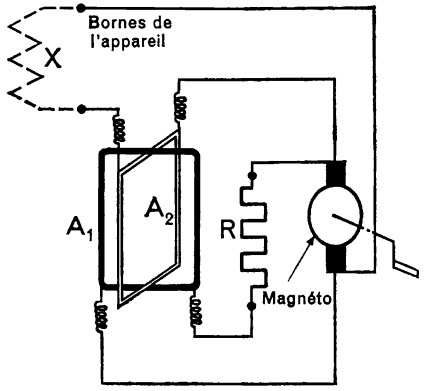


FIG. 5. — Schéma d'un ohmmètre à magnéto. L'aimant n'est pas représenté.

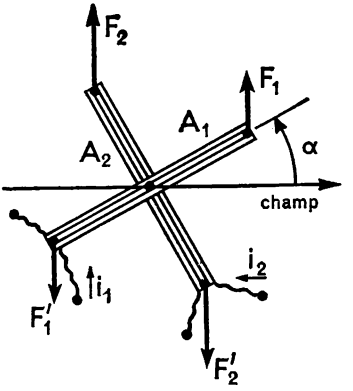


FIG. 6. — A l'équilibre les couples formés par les forces F_1 et F'_1 et les forces F_2 et F'_2 ont des moments égaux.

L'un des cadres A_1 est en série avec une résistance connue R, l'autre A_2 est mis en série avec la résistance à mesurer X. Les résistances des cadres sont négligeables devant R et X.

La magnéto alimente ces deux ensembles en dérivation sous une tension U qui dépend de la vitesse avec laquelle on tourne la manivelle. Elle produit dans A_1 un courant $i_1 = U : R$ et dans A_2 un courant $i_2 = U : X$.

Le rapport $\frac{i_1}{i_2} = \frac{X}{R}$ est indépendant de U.

Les cadres parcourus par des courants et placés dans un champ magnétique sont soumis à des forces électromagnétiques perpendiculaires à la direction du champ et proportionnelles aux courants. Pour chaque cadre ces forces forment un couple (fig. 6).

L'ensemble des deux cadres tournant librement prend une position telle que les deux couples s'équilibrent : leurs moments sont égaux.

1. Une magnéto est une petite dynamo dont l'inducteur est un aimant permanent.

Soit α l'angle à l'équilibre du cadre A_1 avec la direction du champ et l la largeur du cadre :

$$\text{couple sur } A_1 = K i_1 l \cos\alpha$$
$$\text{couple sur } A_2 = K i_2 l \sin\alpha$$
$$i_1 \cos\alpha = i_2 \sin\alpha \qquad \operatorname{tg}\alpha = \frac{i_1}{i_2} = \frac{X}{R}$$

Cette position d'équilibre est indépendante de U, c'est-à-dire de la vitesse de la magnéto, elle ne dépend que de la résistance X.

Une aiguille fixée à l'équipage mobile la repère sur une échelle graduée en milliers d'ohms et mégohms.

Les ohmmètres de monteurs possèdent souvent deux calibres : 0 — 1 *mégohm* et 0 — 100 *mégohms* obtenus en changeant la résistance R.

D. — Mesure de la puissance d'un récepteur ou d'un générateur.

1° A courant continu.

On mesure la tension *U volts* entre les bornes de l'appareil avec un voltmètre, le courant *I ampères* absorbé ou débité avec un ampèremètre.

La puissance cherchée est, en watts :

$$P = U \times I.$$

2° A courant alternatif.

5. Wattmètres.

Vous savez que le déphasage habituel du courant sur la tension dans les appareils à courant alternatif oblige à se servir d'un wattmètre pour les mesures de puissance.

Nous avons étudié les wattmètres électrodynamiques dans la 33e leçon.

Les wattmètres pour mesures industrielles possèdent, en général, avec une échelle de 150 divisions équidistantes, deux calibres de courant 5 et 10 *ampères*, et deux calibres de tension, 150 et 300 *volts*.

L'aiguille dévie de toute l'échelle pour les maximums de tension U et d'intensité I utilisables simultanément et cos $\varphi = 1$. Une division de l'échelle correspond donc à $K = \frac{UI}{150}$ *watts*, par exemple pour 300 *volts* et 10 *ampères* à $K = 20$ *watts*.

6. Cas d'un récepteur ou d'un générateur monophasé.

La bobine de courant est montée comme un ampèremètre en série avec l'appareil dont on mesure la puissance, la bobine de tension est en dérivation.

Pour éviter un court-circuit, à l'intérieur du wattmètre, entre la bobine fixe et la bobine mobile, il convient, pour brancher la bobine de tension, de réunir les bornes de courant et de tension du wattmètre les plus voisines (fig. 7).

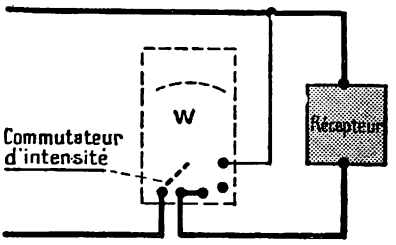


FIG. 7. — **Montage d'un wattmètre** pour mesurer la puissance d'un récepteur monophasé. La borne de tension la plus voisine des bornes d'intensité est connectée à l'une de celles-ci.

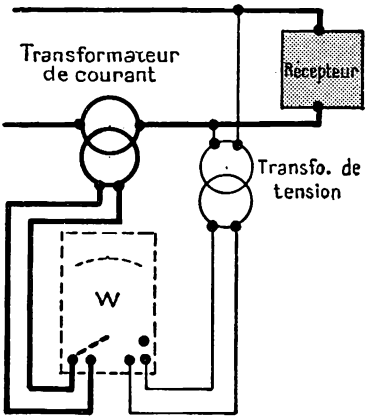


FIG. 8. — Montage d'un wattmètre avec transformateur de courant et de tension.

Dans le cas de grandes intensités ou de tensions élevées, on alimente le wattmètre avec des transformateurs de courant et de tension (fig. 8).

7. Cas d'un récepteur ou d'un générateur triphasé.

a) ***Récepteur triphasé équilibré.*** — C'est, par exemple, un moteur triphasé.

S'il est couplé en étoile, on mesure la puissance dans une phase en montant le wattmètre comme l'indique la figure 9 et l'on multiplie le résultat par 3.

S'il est couplé en triangle, on crée un point neutre artificiel avec trois grandes résistances égales (fig. 10), ou l'on emploie la méthode du double wattmètre convenant pour un récepteur non équilibré.

b) ***Installation triphasée non équilibrée.*** — On peut considérer que la puissance est amenée à l'installation par les fils de phases I et II et que le troisième fil III sert de fil de retour.

La bobine de courant d'un premier wattmètre est mise en série sur la ligne I et celle de tension en dérivation entre I et III. La bobine de

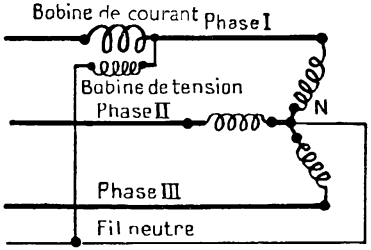


FIG. 9. — Mesure de la puissance d'un **récepteur triphasé** équilibré avec point neutre accessible.

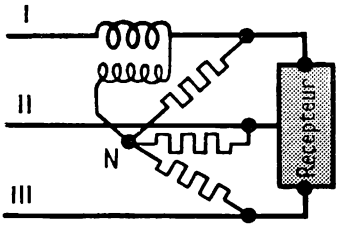


FIG. 10. — Production d'un **point neutre** dans le cas d'un récepteur triphasé couplé en triangle.

courant d'un second wattmètre est mise en série sur la ligne II et celle de tension en dérivation entre II et III (fig. 11).

On fait la somme des indications des deux wattmètres :

$$P = P_1 + P_2.$$

Quand le déphasage du courant par rapport à la tension est supérieur à 60°, l'une des deux puissances est négative. On s'en rend compte parce qu'il faut inverser les connexions à l'une des bobines du wattmètre pour que l'aiguille dévie dans le sens permettant les lectures. On fait alors la différence des puissances mesurées :

$$P = P_1 - P_2.$$

En pratique, on n'emploie qu'un seul wattmètre que l'on place successivement sur les phases I et II, au moyen d'un commutateur tripolaire spécial dont la manœuvre ne coupe pas les courants dans le récepteur (fig. 12).

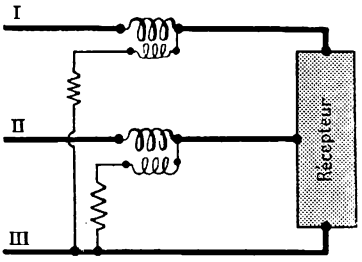


FIG. 11. — Schéma de montage de **deux wattmètres** dans le cas d'un récepteur triphasé équilibré ou non.

8. Montage d'un wattmètre pour puissance réactive.

La puissance active d'un récepteur triphasé est

$$P = UI\sqrt{3}\cos\varphi$$

la puissance réactive

$$P_r = UI\sqrt{3}\sin\varphi$$

U est la tension composée entre fils de ligne, I le courant dans chaque fil, φ le déphasage entre l'intensité et la tension simple dans chacun des trois circuits constituant le récepteur.

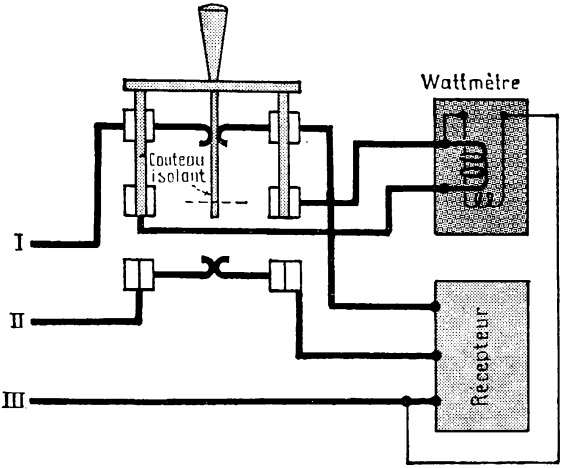


FIG. 12. — **Commutateur** pour l'emploi de la méthode des deux wattmètres avec un seul instrument de mesure.

Dans le diagramme des tensions simples d'un récepteur triphasé (fig. 13), déterminons la tension composée entre les phases 3 et 2 en composant les vecteurs $\vec{V_2}$ et $-\vec{V_3}$. La résultante obtenue, qui a pour valeur $U = V\sqrt{3}$, est normale à la tension simple entre la phase 1 et le point neutre. Cette tension composée est donc déphasée de l'angle $\frac{\pi}{2} - \varphi$ sur l'intensité dans la phase 1.

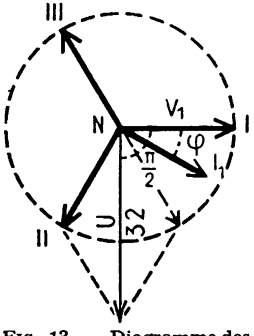


FIG. 13. — Diagramme des tensions simples dans un récepteur triphasé. La tension composée U_{32} est en quadrature avec la tension simple V_1.

En montant la bobine d'intensité d'un wattmètre en série dans la phase I d'un récepteur triphasé et

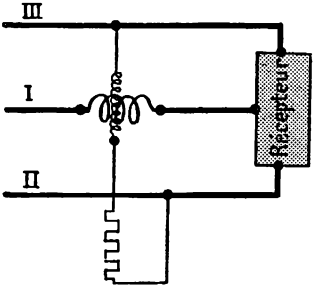


FIG. 14. — Montage d'un wattmètre pour mesurer la **puissance réactive** d'un récepteur triphasé.

la bobine de tension entre les bornes III et II du récepteur (fig. 14) le wattmètre indique une puissance

$$P' = UI \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = UI \sin \varphi.$$

La puissance réactive absorbée par le récepteur est donc

$$P_r = P'\sqrt{3}.$$

EXERCICES

1. On possède deux voltmètres de calibre 300 *volts*, l'un V_1 de résistance *200 000 ohms*, l'autre V_2 de résistance inconnue.

Pour mesurer une tension qui dépasse 300 *volts*, on met l'ensemble des deux voltmètres en série sous la tension à évaluer. Le voltmètre V_1 indique 275 *volts*, le voltmètre V_2 165 volts.

1° Démontrer que la tension à mesurer est 275 + 165 = 440 *volts*.

2° Calculer la résistance du voltmètre V_2.

Réponse : 120 000 ohms.

2. On a mesuré la puissance d'un récepteur monophasé avec un wattmètre 5 *ampères*—150 *volts*, échelle de 150 divisions, un transformateur de courant dont le rapport de transformation est K = 500/10 et un transformateur de tension de rapport de transformation K' = 3 000/150.

L'aiguille du wattmètre s'est arrêtée à la division 120.

Quelle est la puissance mesurée ?

Réponse : 600 kilowatts.

3. On dispose d'un voltmètre dont le calibre est 300 *V* et la résistance 60 000 Ω. Pour mesurer une tension qui dépasse 300 *V*, on met en série avec le voltmètre une résistance de 20 000 Ω. La lecture faite est 270. Quelle est la tension mesurée ? Quel est le nouveau calibre du voltmètre.

Réponses : 360 V ; — 400 V.

4. *1re Question.* — Un atelier, alimenté par un réseau à courant continu 220 volts, comprend :

1° Un moteur qui absorbe 50 ampères et fonctionne 6 heures par jour.

2° Un moteur de 30 chevaux-vapeur dont le rendement est 0,92 et qui fonctionne 8 heures par jour.

3° 60 lampes de 100 watts.

4° 50 lampes de 60 watts.

Les lampes fonctionnent 4 heures par jour. Le prix de l'énergie est de 12 francs le kilowattheure pour la force motrice et 15 francs pour la lumière.

Quelle est la dépense journalière ?

Quelle doit être la section du branchement alimentant l'atelier si l'on admet une densité de courant de 2 ampères par millimètre carré. Tous les appareils sont susceptibles de fonctionner ensemble.

2e *Question.* — Un village est alimenté par un transformateur triphasé abaissant la tension de 5 000 à 190 volts entre phases.

Le transformateur alimente 6 moteurs triphasés de 5 chevaux-vapeur, ayant un rendement de 0,80, ainsi que 240 lampes de 60 watts branchées entre phase et neutre et bien réparties sur les 3 phases.

Le facteur de puissance de l'ensemble basse-tension est 0,84. Calculer :

1° La puissance totale fournie par le transformateur.

2° La puissance apparente.

3° La tension nominale des lampes.

4° La puissance absorbée au réseau si le rendement du transformateur est 0,92.

5° L'intensité du courant dans le branchement haute-tension si le facteur de puissance est 0,82.

Examen du C. A. P. (Electricien-monteur, Électricien-bobineur, Plateforme d'essais)-1951.

Compteurs électriques. Tarification de l'énergie électrique.

A. — Compteurs pour courant continu.

Quelques secteurs continuent à distribuer du courant continu sous 220 et 440 volts.

1. Compteur ampèreheuremètre.

Un modèle souvent employé est le compteur O'K dont l'inventeur est l'ingénieur O'Keenan.

C'est un petit moteur dont l'inducteur est un aimant permanent et dont l'induit n'a pas de carcasse de fer (fig. 1).

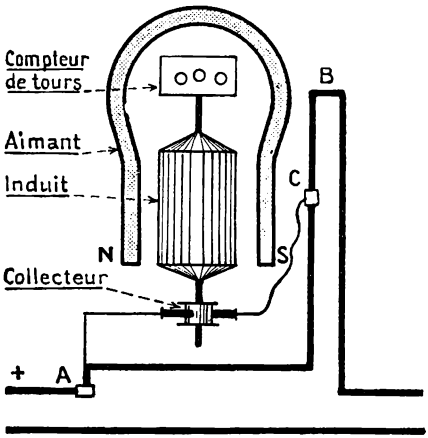


FIG. 1. — Schéma d'un **compteur O'K.** Le conducteur AC est un shunt réglable au moyen du curseur C.

Cet induit en tambour bipolaire est bobiné sur un cylindre en carton. L'axe vertical du tambour pivote à sa partie inférieure sur un rubis. A sa partie supérieure, il se termine par une vis sans fin engrenant avec un compteur de tours. Le fil de l'induit est fin. Le tout petit collecteur et les deux balais sont en argent.

L'induit est traversé par un courant de quelques milliampères pris sur un shunt AC parcouru par le courant I absorbé par l'installation. R étant la résistance de ce shunt, la tension appliquée aux bornes du tambour est $u = RI$. La f. c. é. m. de l'induit est à peu près égale à cette tension

$$e = u = RI.$$

Si Φ est le flux constant de l'inducteur, n le nombre des conducteurs du tambour, N la vitesse du tambour en tours par seconde :

$$e = n\,N\Phi.$$

Donc

$$RI = n\,N\Phi$$

$$N = \frac{R}{n\Phi}\,I.$$

Puisque n, Φ et R sont des grandeurs constantes :

$$N = kI.$$

Au bout de t secondes :

$$Nt = kIt.$$

Le nombre de tours de l'induit est proportionnel à la quantité d'électricité débitée par la ligne : le compteur est un ampèreheuremètre.

La distribution d'énergie électrique est faite à tension constante, le nombre de tours du compteur est aussi proportionnel à l'énergie consommée dans l'installation. En intercalant des roues convenables dans la minuterie, les cadrans indiquent des *hectowatt-heures* ou des *kilowattheures* (fig. 2).

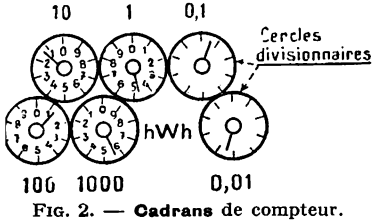


FIG. 2. — **Cadrans** de compteur.

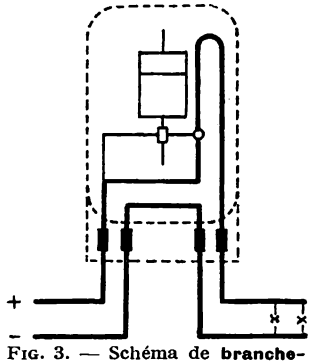


FIG. 3. — Schéma de **branchement** d'un compteur O'K.

La figure 3 est le schéma de branchement d'un compteur O'K.

2. Compteur wattheuremètre.

Le compteur Thomson (fig. 4) est fait d'un *induit* en tambour bobiné en fil fin sur un cylindre en carton monté sur axe vertical. A la partie supérieure, l'arbre porte un petit collecteur en argent et une vis sans fin qui commande une minuterie; à la partie inférieure, il entraîne un disque d'aluminium freiné par deux aimants permanents.

L'inducteur est constitué par deux bobines de gros fil, sans noyaux de fer, embrassant l'induit.

Le compteur est donc un moteur à courant continu, sans fer, entraînant un disque à courants de Foucault.

L'inducteur est parcouru par l'intensité totale I de l'installation. Le flux produit Φ est proportionnel à I.

L'induit, avec une grande résistance en série, est monté entre les deux fils de ligne. Il tourne fort lentement (moins d'un tour par seconde), sa f. c. é. m. est négligeable et l'intensité *i* qui le parcourt est proportionnelle à la tension U de l'installation.

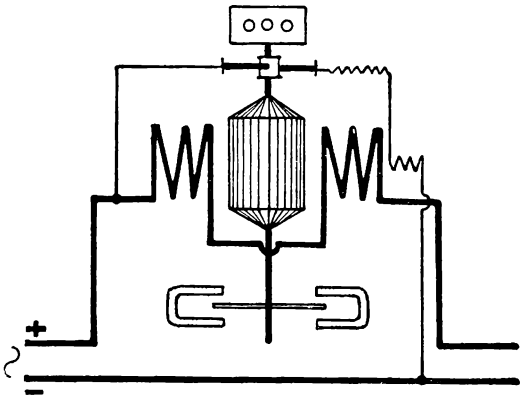


FIG. 4. — Schéma d'un **compteur Thomson.**

Le couple moteur du compteur est donc proportionnel à UI, puissance consommée dans l'installation :

$$C_m = kUI.$$

Le disque d'aluminium, qui tourne à N *tours par seconde*, produit un couple résistant dû aux forces électromagnétiques qui s'exercent entre les aimants et les courants de Foucault induits dans le disque. Le flux des aimants est constant, le couple résistant est donc proportionnel à l'intensité des courants de Foucault. Or cette intensité est proportionnelle aux f. é. m. induites, c'est-à-dire à la vitesse N du disque, donc

$$C_2 = k'N.$$

En marche normale, couple moteur et couple résistant sont égaux :

$$kUI = k'N \quad et \quad N = \frac{k}{k'} UI.$$

Au bout de *t secondes :*

$$Nt = \frac{k}{k'} UIt.$$

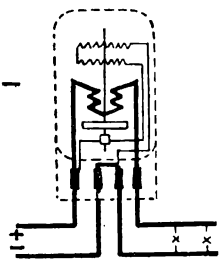


FIG. 5. — Schéma de **branchement** d'un compteur Thomson.

Le nombre de tours de l'induit du compteur est proportionnel à l'énergie consommée dans l'installation : le compteur est un *wattheuremètre.* Les cadrans de la minuterie sont gradués en *hectowattheures* ou en *kilowattheures.*

La figure 5 est le schéma de branchement d'un tel compteur.

B. — Compteurs à courant alternatif.

3. Compteurs d'induction.

Un modèle monophasé de ces compteurs est représenté schématiquement par la figure 6. Il se compose de deux électro-aimants, l'un excité par le courant total I de l'installation, l'autre par un courant i pris en dérivation entre les fils de igne, proportionnel à la tension U de l'installation et, de plus, déphasé de $\frac{\pi}{2}$ en arrière de cette tension par la grande self-induction de l'électro-aimant.

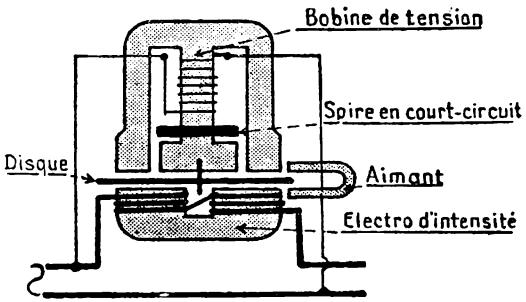


FIG. 6. — Schéma d'un **compteur d'induction.**

Ces deux électros produisent des courants de Foucault dans un disque d'aluminium monté sur un axe vertical et le font tourner. On démontre que le couple moteur produit est

$$C_m = kUI \cos \varphi.$$

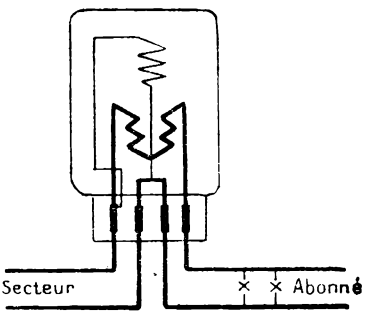


FIG. 7. — **Branchement** d'un compteur d'induction monophasé.

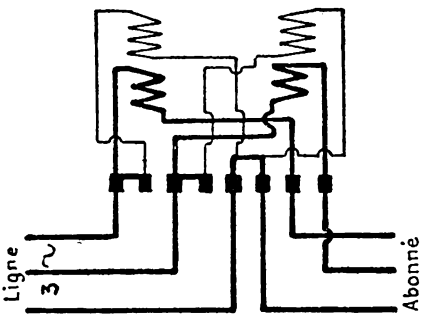


FIG. 8. — **Branchement** d'un compteur triphasé sur distribution à trois fils. Les connexions sont disposées comme pour la mesure d'une puissance par la méthode des deux wattmètres.

Le disque, dont la vitesse est N *tours par seconde*, est freiné par un aimant permanent, le couple résistant a pour valeur :

$$C_2 = k'N.$$

En régime normal les deux couples sont égaux, d'où

$$N = \frac{k}{k'} UI \cos \varphi.$$

Au bout de t secondes

$$Nt = \frac{k}{k'} UI \cos \varphi \, t$$

le nombre de tours du disque, indiqué par la minuterie, *est donc proportionnel à l'énergie consommée.*

La figure 7 indique comment on branche un compteur monophasé.

La figure 8 est le schéma de montage d'un compteur triphasé dans une distribution à trois fils. Deux équipages monophasés agissent sur le même disque d'aluminium. Ils sont branchés comme deux wattmètres dans la mesure d'une puissance triphasée.

C. — Tarification de l'énergie électrique.

Électricité de France offre aux usagers plusieurs modes de tarification de l'énergie électrique. Voici, à titre de renseignement, quelques-uns des tarifs appliqués à Paris au 1er-1-1960. Les prix donnés s'entendent toutes taxes fiscales comprises, mais ils ne comprennent pas les frais fixes relatifs aux compteurs. Dans les départements, les tarifs ont des structures analogues; les prix peuvent être légèrement différents.

4. Energie fournie à basse tension.

I. Usages domestiques.

a) ***Tarif éclairage.*** — C'est le plus simple et l'un des plus usités pour les petites installations. L'abonné paye tous les *kilowatts-heures* au même prix; à Paris, au 1er-1-1960 0,331 *francs* (F).

b) ***Tarif éclairage et usages domestiques.***
C'est un tarif à tranches dans lequel l'importance des tranches est généralement fonction du nombre de pièces de l'appartement. A titre d'exemple et jusqu'à 3 pièces nous avons en *kWh* :

		Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
1 pièce	1re tranche	10	8	8	2	2	2	2	2	2	6	8	8	60
	2e tranche	3	3	3	2	2	2	2	2	2	3	3	3	30
2 pièce	1re tranche	15	12	12	3	3	3	3	3	3	9	12	12	90
	2e tranche	5	5	4	3	3	3	3	3	3	4	4	5	45
3 pièce	1re tranche	20	16	16	4	4	4	4	4	4	12	16	16	120
	2e tranche	6	6	6	4	4	4	4	4	4	6	6	6	60

Lors de chaque relevé la consommation est répartie en 3 tranches, dont les prix sont les suivants :

1re tranche : 0,331 F; 2e tranche 0,24 F; 3e tranche : hiver 0,132 F, été 0,077 F.

c) ***Tarif heures creuses.*** — Il convient pour les appareils de chauffage à accumulation.

Ce tarif n'est cité que pour mémoire, les heures et les prix correspondants étant variables suivant les localités.

2. Usages non domestiques.

Pour les *usages commerciaux et industriels*, il existe deux tarifs, le premier concernant l'éclairage, le deuxième les autres usages. Il s'agit dans les deux cas de *tarifs à tranches*, les tranches étant fonction de la puissance souscrite, controlée par un disjoncteur.

La 1re tranche correspond aux premiers 500 *kWh* consommés par an et par *kW* de puissance souscrite. La 2e tranche aux *kWh* consommés entre 500 et 900 *kWh* par an et par *kW*. La 3e tranche représente le surplus.

Les prix du *kWh* étaient à Paris au 1er-1-1960 :

	ÉCLAIRAGE	AUTRES USAGES
1re tranche	0,367 F	0,222 F
2e tranche	0,275 F	0,188 F
3e tranche	0,183 F	0,166 F

5. Energie fournie à haute tension.

Le tarif haute tension dit « *tarif vert* », qui remplace progressivement les anciens tarifs, comporte 2 éléments :

1° une *prime fixe* fonction de la puissance souscrite en nouveaux francs par kilowatt souscrit.

2° le *prix de l'énergie* consommée, variable selon l'heure et la saison.
L'hiver correspond à la période du 1er novembre au 28 février, l'été du 1er mars au 31 octobre.
La journée est divisée en 3 périodes horaires l'hiver et 2 seulement l'été :

Pointe (P) : de 7 *heures* à 9 *heures* et de 17 *heures* à 19 *heures* tous les jours, sauf dimanche, pendant les mois d'hiver;

Heures pleines (HP) : de 6 à 22 *heures* tous les jours, sauf le dimanche et en dehors des heures de pointe;

Heures creuses (HC) : de 22 *heures* à 6 *heures* en semaine, le dimanche toute la journée.
Le prix du *kWh* décroît dans l'ordre suivant :
Pointe, HP hiver, HP été, HC hiver, HC été.
Le tableau V page 515 donne ces prix pour la tension de 15 000 *volts*.
Il existe quatre tarifs entre lesquels il est possible d'opter au moment de la souscription :
le tarif général,
le tarif d'appoint pour longues utilisations;
le tarif pour courtes utilisations,
le tarif de secours.

Les *consommations d'énergie réactive* donnent lieu à facturation ou à bonification selon qu'elles sont supérieures ou inférieures à 60 % de l'énergie active. Par exemple si l'énergie active est supérieure à 60 % de l'énergie active ($\cos\varphi$ moyen inférieur à 0,857), le *k Varh* est facturé 0,0109 francs en hiver.

EXERCICES

1. Déterminer la consommation annuelle d'énergie électrique d'une famille de 3 personnes habitant un appartement de 3 pièces.

Pour tenir compte des vacances de 1 mois, on admettra que l'année se compose de 11 mois, 48 semaines, 330 jours.

	Puissance en jeu en watts	DURÉE MOYENNE de fonctionnement		Puissance en jeu en watts	DURÉE MOYENNE de fonctionnement
	300	3 mois, 5 h. par jour	**Nettoyage**		
Éclairage	100	4 mois, 3 h. par jour	Aspirateur	300	2 h. par semaine
	50	4 mois, 1 h. par jour	**Lingerie**		
Poste de TSF	75	1 heure par jour	Machine laver	500	1 h. 30 par semaine
Cuisine			Fer à repasser	300	2 h. par semaine
			Cabinet toilette		
Chauffe-eau	800	3 heures par jour	Chauffe-eau	1 200	5 h. par jour
	100	4 mois, 8 h. par jour	**Chauffage**		
Frigorifique	100	4 mois, 6 h. par jour	Radiateurs		
	100	3 mois, 4 h. par jour	d'appoint	1 600	4 mois, 2 h. par jour

Calculer la dépense annuelle, en appliquant :

1° le tarif éclairage,

2° le tarif éclairage et usages domestiques.

2. Une installation électrique comprend :

a) une installation d'éclairage;

b) un moteur monophasé.

Avec un ampèremètre on fait les observations suivantes :

1° le moteur fonctionnant seul, intensité absorbée : 6 *A*;

2° les lampes fonctionnant seules, intensité absorbée : 10 *A*;

3° les lampes et le moteur fonctionnant ensemble, intensité absorbée : 15,5 *A*.

On demande de déduire de ces observations :

1° le $\cos\varphi$ du moteur;

2° le $\cos\varphi$ de l'installation lorsque toutes les lampes et le moteur fonctionnent simultanément.

La tension entre les bornes du moteur est 110 *V*; calculer la puissance en chevaux qu'il absorbe.

Réponses : 0,866; — 0,98; — 0,77 ch.

Arc électrique.
Tubes fluorescents.

A. — Arc électrique.

1. Produisons un arc entre deux bâtons de charbon.

a) Relions deux bâtons pointus de charbon, placés dans le prolongement l'un de l'autre, aux pôles positif et négatif d'une distribution à 110 *volts* en intercalant dans le circuit une résistance d'environ 8 *ohms*, un ampèremètre et un voltmètre (fig. 1).

b) Mettons en contact les deux pointes de charbon. Elles rougissent parce que la résistance est importante au point de contact.

Écartons les charbons de 3 à 4 *millimètres :* une lumière éblouissante se produit aux pointes qui deviennent incandescentes, une sorte de flamme les réunit : on dit qu'il s'est formé **un arc électrique.**

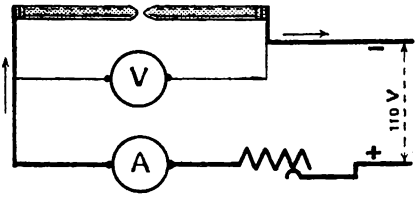


FIG. 1. — **Production d'un arc électrique** alimenté par du courant continu.

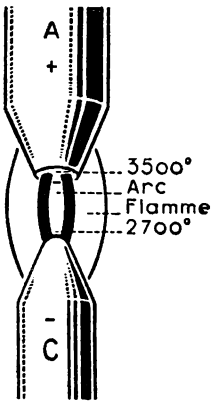


FIG. 2. — **Schéma d'un arc électrique** entre deux électrodes de charbon.

Les charbons s'usent peu à peu, quand leur distance atteint 7 ou 8 millimètres, l'arc s'éteint. Il se maintiendrait jusqu'à usure des charbons si on les rapprochait de temps en temps.

2. Le cratère positif est très lumineux et très chaud.

L'extrémité du charbon positif se creuse. Le fond du cratère qui s'y forme est extrêmement lumineux (fig. 2); il fournit plus de 80 % de

la lumière émise. La surface de la partie très lumineuse est fort petite, son *éclat* ou *brillance* atteint 350 candelas par millimètre carré. L'intensité lumineuse est d'environ 1,4 candela par watt consommé.

La température au fond du cratère positif est évaluée à 3 500 degrés. La pointe du charbon négatif est moins chaude, ainsi que la flamme qui réunit les deux électrodes.

3. Caractéristiques électriques de l'arc.

Un arc entre deux charbons de 10 millimètres de diamètre absorbe une douzaine d'ampères. Avec des charbons très gros, le courant atteint plusieurs centaines d'ampères.

La tension entre les charbons est de 30 à 40 *volts* suivant leur qualité. Une résistance en série est nécessaire pour stabiliser le courant absorbé.

On peut alimenter un arc électrique avec du courant alternatif à la fréquence standard. Les deux charbons ont alors le même aspect.

Il est aussi possible de produire un arc entre deux tiges métalliques, d'acier par exemple. La tension nécessaire est plus faible, environ 25 *volts*.

4. Usages de l'arc électrique.

a) Des lampes à arc ont été très employées, il y a une quarantaine d'années, pour éclairer de grands espaces, surtout en plein air.

Elles comportaient un *régulateur* pour rapprocher les charbons à mesure qu'ils s'usaient. Les charbons duraient une dizaine d'heures, il fallait les remplacer. Les lampes à arc exigeaient trop d'entretien; elles ont disparu quand on a su fabriquer des lampes à incandescence puissantes, de faible consommation et qui durent un millier d'heures.

b) Parce que l'arc électrique est une source lumineuse presque ponctuelle, il reste employé dans les appareils à projection, phares, cinémas, etc... Il est alors alimenté par du courant continu.

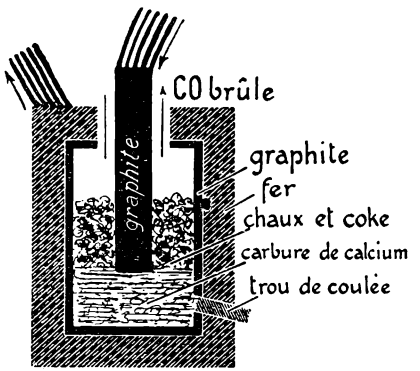


FIG. 3. — **Four à arc** pour la fabrication du carbure de calcium.

c) A cause de la haute température qu'il fournit, on l'utilise dans les fours à arc industriels comme ceux qui servent à affiner l'acier, à fabriquer le carbure de calcium (fig. 3).

d) Actuellement l'arc électrique est surtout employé à la soudure autogène des métaux ferreux. On établit l'arc entre la pièce à souder et une électrode du même métal, entourée d'une gaine de substances minérales qui sert de fondant. La soudure à l'arc est parfois effectuée par des machines automatiques pour des fabrications en série (fig. 4).

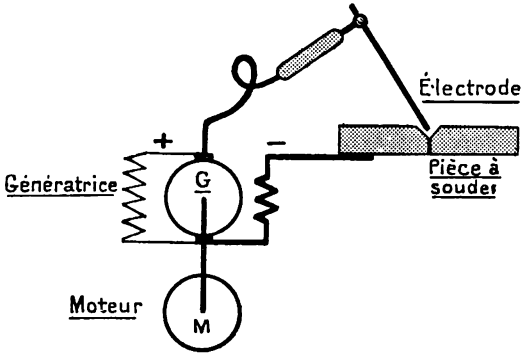


FIG. 4. — Schéma d'une **installation de soudure** à l'arc. Remarquez les polarités de la tige de soudure et de la pièce à souder.

B. — Tubes luminescents.

5. Tubes au néon.

Ce sont les tubes des enseignes lumineuses d'un rouge éclatant, fort en vogue depuis quelques années.

Les plus usités sont des tubes en verre de 18 *millimètres* de diamètre dont la longueur peut atteindre 16 *mètres*. Ils sont munis d'une électrode en fer à chaque extrémité. Ils contiennent seulement du néon [1] à une pression de l'ordre du millimètre de mercure.

Quand on établit une tension suffisante, continue ou alternative, entre les deux électrodes du tube, le gaz s'illumine et produit la lumière rouge que vous connaissez.

L'intensité du courant est à peu près 100 *milliampères*. La tension entre les électrodes est d'environ 600 *volts* par mètre de tube, plus 350 *volts* de chute de tension aux électrodes. La couleur intense de la lumière produite ne permet pas de mesurer même grossièrement l'intensité lumineuse obtenue. La température du tube en fonctionnement est d'une quarantaine de degrés, les électrodes sont plus chaudes : 150°. Un tube au néon dure en moyenne 10 000 *heures*.

Dans l'emploi de ces tubes luminescents, on distingue :

la **tension de fonctionnement** U dont nous venons d'indiquer la valeur;

---

1. Le néon est un gaz de l'atmosphère où il existe à raison de 15 litres pour 1 000 mètres cubes. On le sépare des autres gaz de l'air en distillant l'air préalablement liquéfié.

la **tension d'allumage** ou **d'amorçage** U_a qui est 2 à 3 fois plus grande que la tension de fonctionnement;

la **tension d'extinction,** U_e, qui est environ les $\frac{2}{3}$ de U.

Une surtension est donc nécessaire pour allumer le tube. On la produit, dans le cas d'emploi de courant alternatif, en alimentant le tube avec un *transformateur à fuites magnétiques*. La figure 5 est le schéma d'un tel transformateur. Quand le secondaire ne débite pas de courant, sa tension est élevée; quand il fournit du courant, il produit un flux magnétique opposé au flux primaire; le flux primaire se ferme en partie par la dérivation magnétique que facilite la forme de la carcasse et il induit une tension secondaire plus faible.

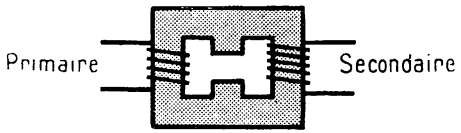


FIG. 5. — **Transformateur à fuites magnétiques.** Quand le secondaire débite du courant, une partie de flux primaire passe par la dérivation magnétique amorcée entre les deux traverses du transformateur.

Le transformateur à fuites stabilise aussi le courant secondaire qui a

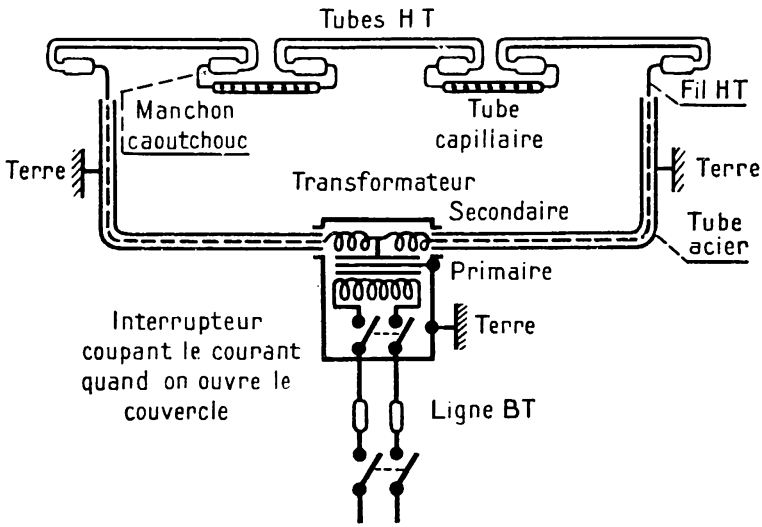


FIG. 6. — **Installation de trois tubes au néon.** Remarquez les précautions de sécurité: carcasse du transformateur à la terre; coffret dont l'ouverture coupe le courant; fils HT dans les tubes d'acier mis à la terre; connexions entre les tubes sous caoutchouc et sous verre.

tendance à augmenter parce que la résistance du tube diminue quand le courant croît.

6. Installation d'un tube au néon.

La tension de fonctionnement, comprise entre 1 200 *et* 10 000 *volts suivant la longueur du tube, est très dangereuse.* Aussi l'installation, dite de deuxième catégorie, est-elle astreinte à des conditions sévères. On en trouvera le détail dans la brochure C. 71 de l'UTE.

La figure 6 est le schéma de montage en série de trois de ces tubes.

7. Lampe à vapeur de sodium.

C'est un tube en verre de longueur réduite, coudé en U, placé dans une cloche en verre à double paroi qui l'empêche de se refroidir. La lampe est munie d'un culot à baïonnette comme une lampe à incandescence (fig. 7).

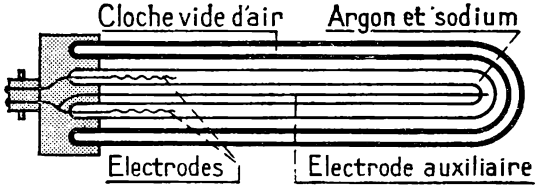


FIG. 7. — Schéma d'une **lampe à vapeur de sodium.** Remarquez la troisième électrode qui facilite l'amorçage.

Le tube contient de l'argon[1] sous faible pression et un peu de sodium. Le courant est amené par deux électrodes en tungstène recouvertes de baryte. Une troisième électrode facilite l'amorçage.

On alimente la lampe par un transformateur à fuites qui fournit la surtension d'amorçage. A l'allumage, le gaz s'illumine d'abord, la chaleur fond et vaporise le sodium, la vapeur de sodium s'illumine à son tour et donne une abondante lumière jaune.

On fabrique de telles lampes de 45 à 140 *watts*; elles produisent de 4,4 à 5,7 candelas par watt. Elles durent normalement 3 000 *heures*. Elles servent à éclairer des ateliers et surtout, aux abords des grandes villes, des routes très fréquentées.

7. Lampe à vapeur de mercure.

C'est un tube de verre, long d'environ 1 mètre, dans lequel on a fait le vide, qui possède une anode de fer et une cathode de mercure (fig. 8).

---

1. L'argon est, comme le néon, extrait de l'air atmosphérique qui en contient environ 10 litres par mètre cube.

Il fonctionne sous une tension de 110 *volts*. On l'amorce en le basculant jusqu'à ce qu'il soit horizontal et qu'un filet de mercure s'étende entre les électrodes; une étincelle jaillit; on replace le tube dans sa position inclinée normale; le courant continue à passer dans la vapeur de mercure que contient le tube et l'illumine en bleu verdâtre. Cette lumière contient beaucoup de rayons ultra-violets arrêtés d'ailleurs par le verre du tube.

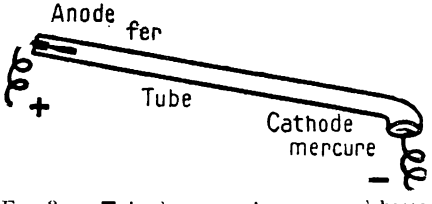


FIG. 8. — **Tube à vapeur de mercure** à basse pression. Il est long d'environ 1 *mètre* et a 25 *millimètres* de diamètre. Il fonctionne dans une position inclinée comme l'indique la figure.

La lampe peut être alimentée par du courant alternatif, elle ne laisse passer le courant que dans le sens fer-mercure.

Elle fournit 2,5 à 3 candelas par watt consommé. La lumière est d'une couleur désagréable, qui donne aux visages une teinte cadavérique.

Des lampes à vapeur de mercure équipent les machines à tirer les dessins sur papier ferro-prussiate ou ozalid. Pour l'éclairage des ateliers ou des grands halls, on leur adjoint des lampes à incandescence ordinaires qui améliorent la teinte de la lumière produite.

C. — Tubes fluorescents.

8. Substances fluorescentes.

Notre œil perçoit peu ou pas du tout certaines radiations émises par les sources lumineuses. Par exemple, nous ne voyons pas les *radiations infra-rouges* que nous percevons sous forme de chaleur, ni les *radiations ultra-violettes* dont la longueur d'ondes est inférieure à 0,4 *micron* et qui possèdent donc une fréquence de plus de 750 *trillions* de périodes par seconde,

Quelques substances absorbent cette « lumière ultra-violette » et la transforment en lumière visible : ce sont des **substances fluorescentes.** Elles restituent, en en diminuant la fréquence, les radiations à fréquence très élevée qu'elles reçoivent.

Parmi ces corps fluorescents, citons les poudres de :

borate de cadmium, donnant une lumière *rose*,
silicate de glucinium, — *jaune*,
tungstate de calcium, — *bleue*, etc.

En mélangeant ces poudres en proportions convenables, on obtient une lumière dont la teinte est soit *blanc*, ou *blanc lumière du jour*, ou *blanc chaud*, c'est-à-dire un peu rosé.

Avec ces mélanges, **on a transformé les tubes luminescents à vapeur de mercure en tubes fluorescents.**

9. Constitution d'un tube fluorescent.

On fabrique des **tubes-lampes à basse tension** pour l'éclairage des appartements et des bureaux; ils sont courts, de 0,20 *mètre* à 1 *mètre*, et des **tubes à haute tension** pour les locaux industriels et commerciaux qui ont jusqu'à 16 *mètres* de long.

Ce sont des tubes de verre, avec une électrode à chaque extrémité, dans lesquels on a fait le vide et introduit quelques gouttes de mercure avec un peu d'*argon* pour faciliter l'amorçage. La paroi interne des tubes est couverte d'une couche adhérente du mélange de poudres fluorescentes.

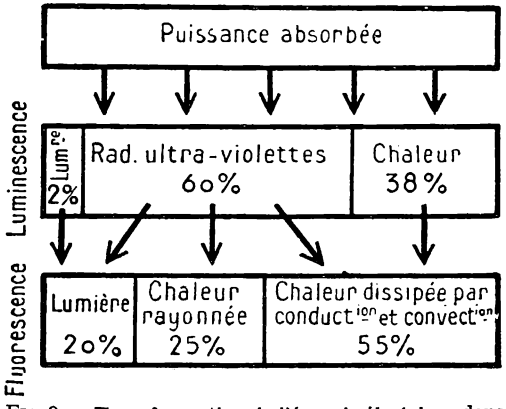


FIG. 9. — **Transformation de l'énergie électrique** dans un tube de 40 *watts* au stade fluorescent. Les 2 % de lumière luminescente sont arrêtés par le tube que l'enduit intérieur rend opaque.

Les constructeurs cherchent à réaliser les conditions de production, par la luminescence de la vapeur de mercure à basse pression de la radiation ultraviolette de 0,253 7 *micron* à laquelle les poudres fluorescentes sont très sensibles. L'enduit fluorescent transforme cette radiation en lumière visible.

La figure 9 indique dans quelles proportions l'énergie électrique fournie à un tube fluorescent de 40 *watts* se transforme en chaleur et lumière.

Elle montre que le rendement en énergie lumineuse atteint 20 %, soit presque 3 fois plus que celui d'une lampe à incandescence.

Les tubes fluorescents fournissent environ 3,6 bougies par watt. Ils ne s'échauffent pas plus que les tubes luminescents.

La durée des tubes HT est en moyenne de 10 000 heures, celle des tubes BT de 2 000 heures.

10. Amorçage des tubes fluorescents.

En ce qui concerne l'amorçage, on distingue les tubes à **électrodes froides** et les tubes à **électrodes chaudes.**

a) ***Tubes à électrodes froides.*** — Tous les tubes HT sont à électrodes froides ainsi que quelques modèles BT. La tension d'amorçage d'un tel tube, assez élevée, est fournie simplement par le transformateur à fuites d'alimentation, qui sert en même temps à limiter l'intensité en fonctionnement normal.

L'installation des tubes HT réclame les mêmes précautions d'isolement que celle des tubes luminescents puisqu'elle met en jeu des tensions qui peuvent atteindre 10 000 *volts.*

Les tubes BT sont alimentés, soit avec une bobine de self en série quand on dispose de 220 *volts,* soit par un transformateur à fuites sur un secteur à 115 *volts.*

b) ***Tubes-lampes fluorescents à électrodes chaudes.*** — Ils sont employés pour l'éclairage des appartements, des bureaux, des petits magasins et fonctionnent avec les tensions usuelles des réseaux nationaux, soit 220, soit 115 *volts.*

Constitués par des tubes de 25 à 38 *millimètres de* diamètre, ils ne dépassent pas 1 *mètre* de long. Ces tubes sont pourvus à chaque extrémité d'une électrode faite d'un filament spiralé de tungstène enrobé de baryte (fig. 10).

Les électrodes, préalablement chauffées au rouge, permettent un amorçage à tension moins élevée que les électrodes froides.

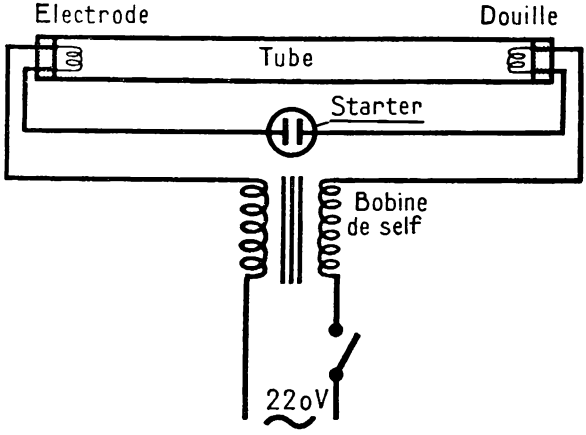


FIG. 10. — Schéma d'un **tube fluorescent à électrodes chaudes.**

L'amorçage est effectué automatiquement par un petit interrupteur nommé **starter** dont le rôle, à la fermeture de l'interrupteur commandant la lampe, est :

1° de fermer le circuit des électrodes pour qu'elles s'échauffent au rouge par chaleur Joule;

2° de produire par coupure du courant qui le traverse une surtension de self qui amorce le tube;

3° de sortir du circuit et de cesser de fonctionner dès que l'amorçage est obtenu.

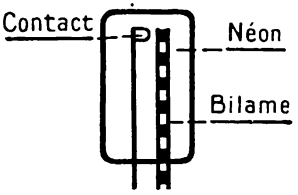


FIG. 11. — Dessin simplifié d'un **starter**. C'est une petite lampe au néon, longue d'environ 2 *centimètres*.

Le starter consiste en une toute petite lampe au néon dont l'une des électrodes est une **bilame** (fig. 11).

La tension d'amorçage de cette petite lampe est comprise entre 140 et 160 *volts*, donc inférieure à la tension fournie à vide aux bornes du tube fluorescent. Sa tension d'extinction, de l'ordre de 130 *volts*, est supérieure à la tension de fonctionnement du tube fluorescent.

Quand on ferme l'interrupteur de la ligne d'alimentation, le starter s'amorce. Il s'échauffe, l'électrode bilame se courbe, vient toucher l'autre électrode et court-circuite intérieurement la lampe au néon. En même temps, le courant qui passe dans les électrodes du tube fluorescent les porte au rouge. Mais la lampe au néon court-circuitée s'est refroidie. La bilame abandonne le contact sur l'autre lame et le courant est coupé. La coupure du courant dans le circuit, qui possède une grande self-induction puisqu'il comprend, soit une bobine de self, soit un enroulement secondaire de transformateur, produit la surtension nécessaire pour amorcer le tube. Le starter cesse de fonctionner parce que la tension à ses bornes est devenue trop faible.

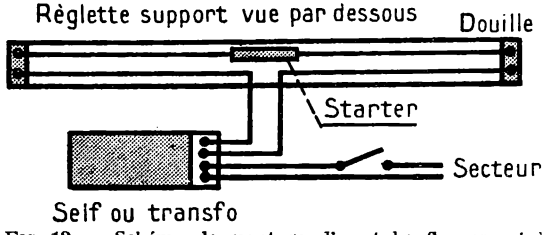


FIG. 12. — Schéma de montage d'un tube fluorescent à électrodes chaudes.

La figure 12 est le schéma de montage d'une lampe-tube fluorescente à électrodes chaudes. Le starter est caché sous le support du tube, le transformateur ou la bobine de self sont dissimulés sur le trajet des lignes d'alimentation.

Les lampes-tubes à cathodes froides et à cathodes chaudes sont

actuellement en concurrence et il n'est pas possible encore de savoir quel est le modèle préférable.

Signalons que la présence de transformateurs et de bobines de self rend très faible le cos φ des installations de tubes fluorescents : il est de l'ordre de 0,40. A partir de 1950, ce facteur de puissance doit être amené à une valeur comprise entre 0,90 et 1 en incorporant un condensateur dans l'appareillage de commande des tubes.

EXERCICES

1. Une installation électrique triphasée, équilibrée, 200 *V* entre phases, comprend un certain nombre de lampes à incandescence et un moteur asynchrone triphasé.

Avec un ampèremètre, on constate que :

1° le moteur fonctionant seul, le courant dans une phase est 15 *A*;

2° les lampes fonctionnant seules, le courant dans une phase est 9 *A*;

3° moteur et lampes fonctionnant ensemble, le courant dans une phase est 22,85 *A*.

On demande de déterminer :

a) le cos φ du moteur;

b) le facteur de puissance de l'installation entière ;

c) la puissance active prise au réseau par le moteur et les lampes ensemble.

Réponses : 0,80; — 0,92; — 7.266 watts.

2. L'installation électrique d'un atelier, qui comprend surtout des petits moteurs asynchrones triphasés, est alimentée par un transformateur de 75 *kVA*, 200 *V*, entre phases, neutre sorti, qui se trouve à 110 *m* du tableau d'arrivée.

Calculer la section, le diamètre et le poids des conducteurs en cuivre de la ligne de transport d'énergie entre le transformateur et le tableau.

Cette ligne sera à 4 fils. Parce que l'installation comprend surtout des récepteurs triphasés équilibrés, la section du conducteur neutre sera moitié de celle des conducteurs de phases. A pleine charge, l'installation est équilibrée.

La chute de tension ne doit pas dépasser 5 %. La résistivité du cuivre est 0,018 $\Omega mm^2/m$, sa densité est 8,9.

Le facteur de puissance de l'installation est 0,80; quelle est la puissance active disponible au tableau ?

Réponses : section : 74,2 mm^2; — diamètre : 9,72 *mm;* — poids : 255 *kg.*

Pratiquement, les conducteurs de phases seront des câbles de 19 brins de 2,25 *mm*, section 75 mm^2; le conducteur neutre, un câble de 19 brins de 1,6 *mm*, section nominale 40 mm^2; la ligne pèsera 259 *kg.*

Puissance active au tableau : 57 *kW.*

Téléphones privés.

Nous n'étudierons que les installations téléphoniques non reliées au réseau des P.T.T.

1. Constitution d'une installation simple.

Elle permet à deux personnes distantes de quelques centaines de mètres de converser entre elles. Chaque poste comprend un *appareil téléphonique*, une *sonnerie d'appel*, une ou deux *piles*. Les deux postes sont réunis par une ligne à deux fils en cuivre.

Un appareil téléphonique possède un *combiné* mobile qui réunit les deux organes téléphoniques essentiels, à savoir un *microphone* et un *récepteur* ou écouteur montés en série. Le combiné est suspendu à un *crochet-commutateur* sortant d'une boîte en bois ou en tôle portant un *bouton d'appel* de sonnerie et les bornes de montage.

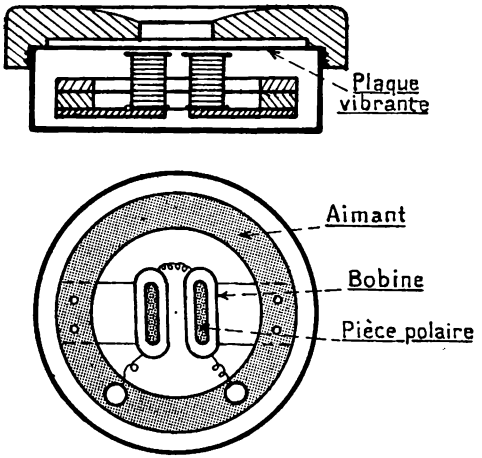


FIG. 1. — **Écouteur téléphonique.**

2. Examinons séparément les divers organes d'un appareil téléphonique.

a) ***Récepteur téléphonique.*** — Il est fait d'un aimant composé de deux anneaux superposés (fig. 1), d'acier trempé et aimantés. Sous les pôles sont rapportées deux équerres en acier doux formant les pièces polaires. Chacune de ces pièces est le noyau d'une petite bobine de fin fil de cuivre isolé. Les deux bobines sont en série.

Une armature faite d'une rondelle en tôle mince d'acier doux est placée très près des noyaux : c'est une plaque vibrante serrée sur le

boîtier en laiton du récepteur par un couvercle en matière moulée qui ne la touche que sur le bord de son pourtour.

Montons un écouteur téléphonique en série avec un élément Leclanché et une lime; frottons sur la lime l'extrémité du fil fermant le circuit : l'écouteur produit un bruit intense (fig. 2).

Les dents de la lime causent des interruptions et des rétablissements de courant dans le circuit. L'aimantation des pièces polaires de l'écouteur varie, la plaque de tôle est attirée plus ou moins fort et vibre.

Un bon écouteur téléphonique est fort sensible, une variation périodique de moins d'un millionième d'ampère y produit un bruit perceptible.

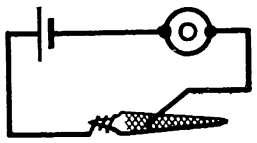


FIG. 2. — Les fermetures et les coupures du courant font vibrer fortement l'écouteur.

b) ***Microphone.*** — Les nombreux modèles de microphones ne diffèrent les uns des autres que par des détails de construction.

A l'intérieur d'une capsule métallique, dont le couvercle est percé de petits trous, est logé un disque en charbon creusé de cavités demi-sphériques contenant chacune plusieurs petites billes de charbon. Une mince plaque vibrante en charbon est en contact avec les billes. La plaque vibrante et le disque de charbon sont isolés électriquement l'un de l'autre, sauf par les billes (fig. 3).

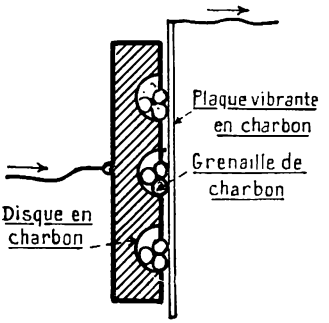


FIG. 3. — Schéma d'un microphone à billes de charbon. La capsule métallique qui enveloppe le microphone n'est pas figurée.

Le courant d'une pile est amené au centre du disque et repris par le métal de la capsule à la périphérie de la plaque vibrante. La résistance qu'offre le microphone au passage du courant dépend de la pression qu'exercent sur les billes les deux surfaces conductrices qui les emprisonnent : pression et résistance varient continuellement quand la plaque vibre, *les vibrations sonores se traduisent en ondulations du courant.*

Avant l'invention de ces microphones à billes, on se servait d'un modèle de microphone plus simple à construire et qu'il est facile de fabriquer comme appareil de démonstration. Il se compose d'un crayon de charbon, pointu à ses extrémités, maintenu sans être bloqué dans des trous creusés dans des blocs de charbon. Ces

blocs sont fixés sur une planchette en sapin, mince pour qu'elle vibre facilement (fig. 4).

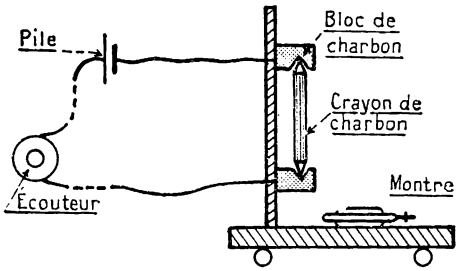


FIG. 4. — On entend le tic-tac de la montre dans l'écouteur, même si la ligne est longue de plusieurs dizaines de mètres.

Montons en série un microphone de démonstration et un écouteur avec un élément Leclanché ou d'accumulateur. Le tic-tac d'une montre placée sur le support du microphone est entendu dans l'écouteur même si la ligne a plusieurs dizaines de mètres de longueur.

La voix est transmise de la même façon.

c) ***Pile microphonique.*** — Signalons que la f. é. m. de la pile qui débite dans le microphone doit être de l'ordre de 2 à 4 volts. Plus élevée, elle produit de minuscules étincelles entre la plaque vibrante et les billes de charbon et il en résulte une « friture » désagréable dans l'écouteur.

On emploie des éléments Leclanché à sac de grande taille ou de grosses piles sèches.

3. Schéma d'une installation téléphonique.

Chaque poste (fig. 5) comporte deux circuits : l'un d'**appel** B, avec un *commutateur d'appel*, une *sonnerie* et une *pile ;* l'autre de **conversation** C, avec un *microphone* et un *écouteur* réunis en un combiné et une *pile*

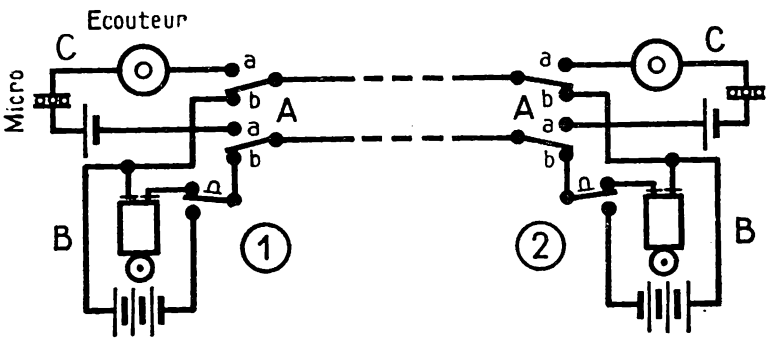


FIG. 5. — Schéma d'une **installation téléphonique**. Les deux postes sont représentés en position de repos.

microphonique. Un *commutateur* **aabb** permet de brancher la ligne A sur l'un ou l'autre circuit.

Ce commutateur fonctionne automatiquement; il est commandé par un crochet mobile auquel on suspend le combiné quand le poste est au repos. Le poids du combiné tire le commutateur vers le bas et la ligne est branchée en **bb** sur le circuit d'appel. Quand on décroche le combiné, un ressort tire le commutateur vers le haut et la ligne est branchéo en **aa** sur le circuit de conversation.

La manœuvre de l'appareil est donc la suivante : quand le correspondant 1 veut converser avec le poste 2, il appuie sur le bouton d'appel B. La sonnerie du poste 2 fonctionne, actionnée par la pile de 1. Les deux correspondants décrochent les combinés et les portent à l'oreille. ils peuvent converser. Remarquez que les piles microphoniques sont alors en série, il faut donc veiller au sens de leur polarité dans le montage.

La conversation terminée, les deux correspondants raccrochent leur combiné.

4. Réalisation d'une installation téléphonique.

Elle s'effectue comme une installation de sonneries. La ligne est faite de fil de cuivre à faible isolement tendu sur de petits isolateurs en os.

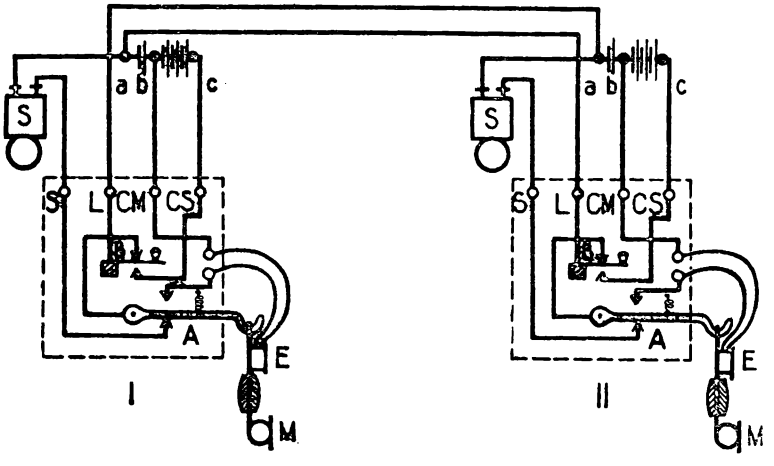


FIG. 6. — **Installation téléphonique simple.** Le commutateur est unipolaire.

Les appareils que l'on trouve dans le commerce sont souvent plus simples que le schéma de la figure 5. La simplification porte sur le

commutateur, qu'il soit unipolaire comme dans la figure 6, ou bien qu'il soit remplacé par un interrupteur incorporé au combiné (fig. 7).

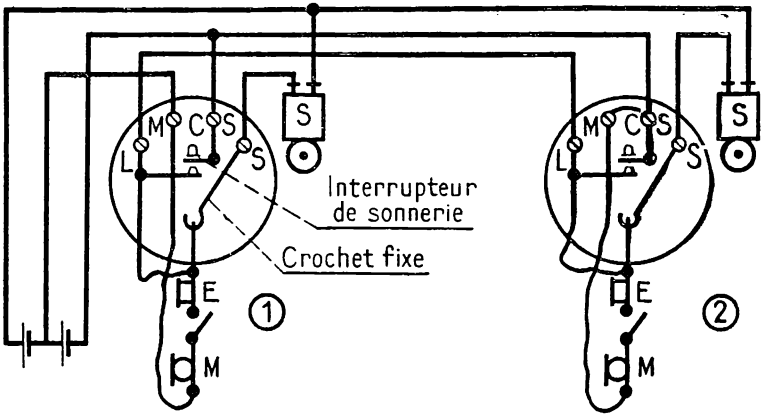


FIG. 7. — Les deux appareils téléphoniques sont reliés par une **ligne à 3 fils.** Il n'y a pas de pile au poste 2. Les combinés sont munis d'un interrupteur à pédale qu l'on maintient fermé quand on tient le combiné à pleine main.

Il peut être commode, quand les postes correspondants sont peu éloignés l'un de l'autre, de rassembler les piles microphoniques et d'appel à l'un des postes seulement en employant un troisième fil de ligne (fig. 7).

5. De tels téléphones, dits à circuit primaire, ont une faible portée.

Le circuit de conversation, qui comprend deux écouteurs, deux microphones, deux piles, une ligne bifilaire plus ou moins longue, a une résistance importante. La variation de résistance d'un microphone pendant la conversation, comparée à la résistance totale du circuit, est faible. On démontre que la variation d'intensité du courant qui en résulte est inversement proportionnelle au carré de la résistance du circuit. Quand la ligne qui réunit les deux postes correspondants est fort longue, les vibrations de l'écouteur ne sont plus perceptibles.

Pour augmenter la portée des communications téléphoniques, les P.T.T. n'emploient que des appareils à **circuit secondaire.**

La figure 8 est le schéma de l'un de ces appareils. Le circuit microphonique ne comprend que le microphone, sa pile et le primaire BT, peu résistant, d'un petit transformateur. Le rapport de transformation

est environ 10. Le secondaire est en série avec la ligne, les écouteurs des deux postes correspondants et le secondaire de l'autre poste.

Ce dispositif présente deux avantages :

1° Le circuit microphonique est peu résistant, les vibrations du microphone y produisent des variations d'intensité relativement importantes;

2° le courant dans la ligne est réduit et la chute de tension qui en résulte est faible.

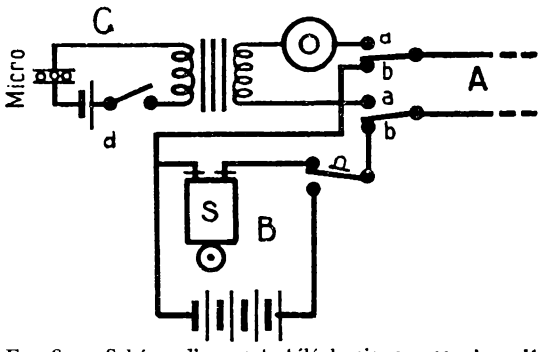


FIG. 8. — Schéma d'un poste téléphonique avec **circuit secondaire.** Le poste correspondant est identique.

Il en résulte qu'avec deux appareils à circuit secondaire, on peut converser à bien plus grande distance qu'avec des appareils à circuit primaire.

Pour que la pile microphonique ne débite pas constamment, un interrupteur **d** est mis dans le circuit, il est fermé seulement quand l'appareil est en position de conversation. Sa manœuvre est commandée automatiquement par le crochet qui fait fonctionner le commutateur aabb.

EXERCICE DE REVISION

1. 1° Trouver la section du fil de ligne et le poids de cuivre nécessaire à un transport d'énergie dans les conditions suivantes :

longueur de la ligne : 30 *kilomètres*;
puissance transportée au départ : 200 *kilowatts*;
tension au départ : 10 000 *volts* en courant monophasé;
pertes consenties en ligne : 10 % de la puissance initiale.
(Densité du cuivre : 8,9; résistivité : 0,016 $\Omega mm^2/m$.)

2° Traiter le même problème en supposant que le transport se fait en courant triphasé par une ligne à trois fils :

a) sans déphasage;
b) avec un facteur de puissance $\cos \varphi = 0{,}75$.
(On négligera la réactance d'auto-induction et la réactance de capacité de la ligne.)

Réponses : 1° 19,2 mm²; — 10,253 tonnes;
2° *a*) 9,6 mm²; — 7,69 tonnes;
b) 17,07 mm²; — 13,68 tonnes.

Paratonnerres.

1. Les orages mettent en jeu des quantités énormes d'énergie.

Les nuages se forment par la condensation de la vapeur d'eau qui s'élève du sol. Un kilogramme de vapeur d'eau à la température de 15° dégage 596 *kilocalories* en se condensant, soit près de 2,5 millions de *joules*. Or on estime qu'un nuage d'un volume d'un kilomètre cube renferme 3 ou 4 millions de kilogrammes d'eau, sa formation produit donc une quantité considérable d'énergie calorifique.

On ignore comment et dans quelle proportion cette chaleur se transforme en énergie électrique.

2. Une tension électrique existe entre les nuages et le sol.

Un nuage est constitué de minuscules gouttelettes d'eau, il forme un mauvais conducteur électrique. Des tensions électriques existent et se maintiennent entre ses différentes parties. Dans nos régions, la tension est le plus souvent *positive* entre le haut et le bas des nuages, *négative* entre la partie inférieure du nuage et le sol (fig. 1).

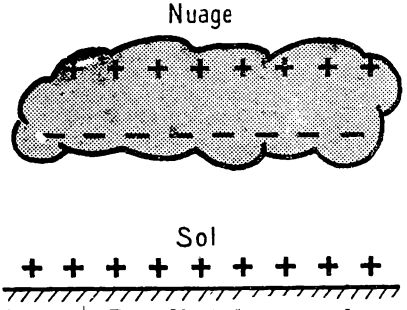


FIG. 1. — Dans 80 % des orages de nos régions, **la partie inférieure des nuages est négative par rapport au sol.**

On a pu évaluer l'ordre de grandeur de cette tension dans le cas de nuages orageux : on l'estime quelquefois à 1 000 millions de *volts*.

3. Foudre, éclairs et tonnerre.

Quand la tension est assez élevée, des décharges électriques se produisent, soit entre deux nuages voisins, soit entre deux parties d'un nuage, soit entre un nuage et le sol. On donne le nom d'**éclairs** à ces décharges et aux phénomènes qui les accompagnent, le **tonnerre** est le bruit des décharges. Le nom de **foudre** est plutôt réservé aux décharges qui atteignent le sol.

La quantité d'électricité mise en jeu dans la série de décharges constituant un coup de foudre est parfois évaluée à une trentaine de coulombs.

Si l'on applique au phénomène la formule de calcul de l'énergie de la décharge d'un condensateur (35e leçon), $W = \frac{1}{2} QV$, on trouve pour un coup de foudre :

$$W = \frac{1}{2} \times 30 \times 1\,000\,000\,000 = 1{,}5\ 10^{10}\ \textit{joules},$$

soit environ 4 000 *kilowattheures*.

En supposant que les décharges d'un coup de foudre se succèdent pendant 1 seconde, la puissance moyenne atteint 15.10^9 *watts*, c'est-à-dire 15 millions de *kilowatts*.

On comprend que les effets destructeurs de la foudre puissent être considérables.

4. Quels sont les points du sol que frappe surtout la foudre ?

Il n'est pas possible de donner une réponse ferme à cette question. Des expériences de laboratoire, faites avec des tensions très élevées, ont montré :

1° que si le nuage orageux est *négatif* par rapport au sol, comme c'est le cas dans le plus grand nombre des orages dans nos régions tempérées, la foudre tombe surtout sur les points du sol les plus élevés : tours, clochers, arbres, etc.;

2° que si le nuage est positif par rapport au sol, cette préférence ne se marque pas.

Cette constatation explique que le modèle ancien de paratonnerre inventé par Franklin n'est pas toujours efficace.

5. Paratonnerre de Franklin.

Il consiste en une tige métallique pointue dressée sur le bâtiment à préserver et mise en communication avec le sol par un bon conducteur.

On attribue à un tel paratonnerre un effet protecteur et un effet préventif.

1° ***Effet protecteur.*** — La foudre frappera cette tige, qui domine tout autre point du bâtiment, et la décharge s'écoulera à la terre par le conducteur sans produire de dégâts. Nous avons indiqué dans le paragraphe précédent que cet effet n'est certain que si le nuage orageux est négatif.

2° ***Effet préventif.*** — Par une pointe portée à haute tension, s'échappe dans l'atmosphère un courant électrique qui diminue la tension. Bien

des savants estiment que cet effet de pointe est trop peu important pour produire un résultat utile.

Actuellement, on réserve ces paratonnerres pour les édifices isolés, très hauts et de peu de surface, surtout pour les hautes cheminées d'usines.

6. Installation d'un paratonnerre à pointe.

Le **paratonnerre** est un tube de fer galvanisé avec une pointe de cuivre parfois dorée.

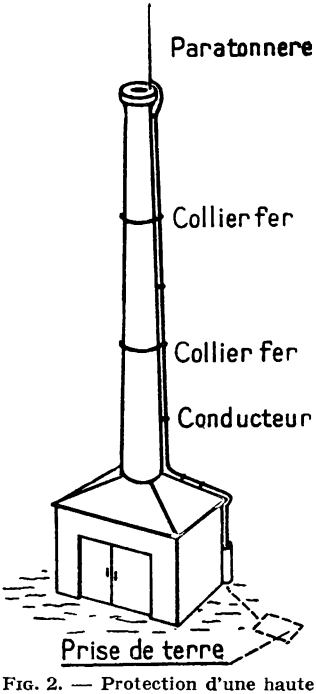


FIG. 2. — Protection d'une haute cheminée d'usine par un **paratonnerre à pointe.**

Le **conducteur,** en cuivre méplat de 35 à 50 *millimètres carrés* de section, descend sans boucles, sans coudes brusques, le long du bâtiment. A quelque distance du sol, il est protégé par un tube de fer d'environ 3 *mètres* de long qui pénètre dans le sol. A l'entrée du tube, une petite barrette permet de séparer le conducteur de la prise de terre pour vérifier la résistance de cette prise qui doit être inférieure à 20 *ohms* (fig. 2).

S'il y a des parties métalliques dans la construction, on les connecte au conducteur de descente.

La **prise de terre** est constituée par une plaque ou un grillage de cuivre, ou une feuille de zinc; elle est enterrée dans un sol humide à 3 ou 4 *mètres* du bâtiment.

L'aluminium ne convient pas dans une installation de paratonnerre à cause de son peu de résistance aux actions chimiques et de sa facilité de fusion. A défaut de cuivre, des conducteurs en fer galvanisé seraient préférables à des conducteurs en aluminium.

7. Paratonnerre de Melsens.

Des objets placés dans une cage métallique, même à larges mailles, échappent à l'action des phénomènes électriques qui se produisent à l'extérieur de la cage, dite de Faraday.

Pour protéger un bâtiment de la foudre, on peut l'entourer, parti-

culièrement à sa partie supérieure, d'un réseau de conducteurs métalliques en bonne communication électrique avec le sol.

Ce type de paratonnerre, nommé *paratonnerre de Melsens*, est plus efficace que le paratonnerre à tige de Franklin.

8. Installation d'un paratonnerre de Melsens.

On emploie les mêmes matériaux que pour un paratonnerre à tige.

Des conducteurs méplats en cuivre, constituant la cage, suivent, à faible distance, les arêtes du bâtiment (fig. 3). Les changements de direction sont effectués par des coudes à grand rayon. Les pièces métalliques importantes de la construction, charpentes en fer, conduites d'eau, sont reliées par de gros conducteurs au réseau extérieur au bâtiment.

On met habituellement des pointes ou des aigrettes sur les points les plus élevés de l'édifice, sans que ce soit indispensable.

Plusieurs descentes au sol sont recommandées, chacune aboutissant à une prise de terre.

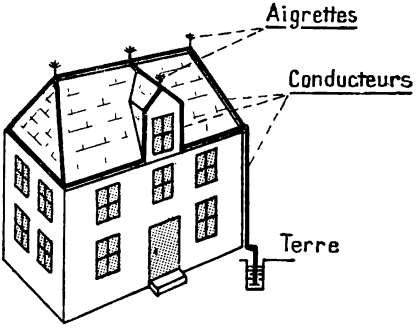
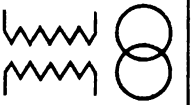


FIG. 3. — **Paratonnerre Melsens.** De gros conducteurs suivent les arêtes du bâtiment en formant une sorte de cage mise à la terre en plusieurs points et surmontée d'aigrettes métalliques.

Des paratonnerres s'imposent sur tous les bâtiments renfermant des matières explosives ou très combustibles et encore sur les édifices importants dans les régions où les orages sont fréquents.

I. PRINCIPAUX SYMBOLES GRAPHIQUES.

Ligne ou canalisation électrique.	Interrupteur unipolaire.
Canalisation électrique avec indication du nombre de conducteurs, (2).	Interrupteur bipolaire.
Conducteurs se croisant sans connexion ni contact électrique.	Interrupteur tripolaire.
Conducteurs se croisant avec connexion.	Commutateur.
Résistance, symbole général.	Commutateur avec numéro de référence.
Résistance non inductive.	Bouton de sonnerie.
Inductance, symbole général.	Disjoncteur.
Inductance à noyau de fer.	Coupe-circuit à fusible.
Rhéostat.	Lampe à incandescence.
Condensateur.	Appareil de cuisson, de chauffage, chauffe-eau.
Prise de courant murale (bipolaire, avec mise à la terre).	Gâche électrique.
	Sonnerie électrique.

Poste téléphonique.		Batterie de piles ou d'accumulateurs.	
Ampèremètre.		Génératrice de courant continu.	
Voltmètre.		Moteur à courant continu.	
Wattmètre.		Transformateur monophasé.	
Compteur.		Alternateur triphasé.	
Élément de pile ou d'accumulateur (le trait long et fin représente le pôle positif).		Moteur triphasé.	
		Redresseur sec de c. a.	

Dans les schémas et plans des installations comprenant des circuits dans lesquels l'énergie est tarifée différemment, on se sert des teintes conventionnelles suivantes pour distinguer les divers circuits :

éclairage	**vert**
force motrice	**orange**
cuisson	**rouge**
chauffage par accumulation fonctionnant la nuit	**bleu**
installations dites à courant faible, sonneries, téléphone, T.S.F.	**jaune.**

II. — RÉSISTANCE ET POIDS DES FILS DE CUIVRE NUS

Il s'agit de fils de cuivre recuit, type défini par la Commission Électrotechnique Internationale. La résistance est donnée à 20°. La résistance spécifique à cette température, est 0,017 214 *ohm* par *millimètre carré* et *mètre*. La masse volumique à 20° est 8,89 *grammes* par *centimètre cube*.

DIAMÈTRES EN MILLIMÈTRES	SECTIONS EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN GRAMMES PAR MÈTRE	LONGUEURS EN MÈTRES PAR KILOGRAMME	RÉSISTANCES EN OHMS PAR KILOMÈTRE
0,50	0,196 3	**1,746 0**	572,7	**87,812**
0,60	0,282 7	**2,513 6**	397,9	**60,975**
0,70	0,384 8	**3,421 3**	292,8	**44,800**
0,80	0,502 7	**4,468 6**	223,8	**34,305**
0,90	0,636 2	**5,656 6**	176,8	**27,100**
1	0,785 4	**6,982 2**	143,3	**21,953**
1,1	0,950 3	**8,448 5**	118,4	**18,143**
1,2	1,131 0	**10,054**	99,46	**15,242**
1,3	1,327 3	**11,800**	84,75	**12,990**
1,4	1,539 4	**13,685**	73,24	**11,200**
1,5	1,767 1	**15,710**	63,65	**9,7567**
1,6	2,010 6	**17,874**	55,95	**8,5753**
1,7	2,269 8	**20,179**	49,56	**7,6135**
1,8	2,544 7	**22,622**	44,21	**6,7911**
1,9	2,835 3	**25,206**	39,67	**6,0810**
2	3,141 6	**27,930**	35,80	**5,4881**
2,1	3,463 6	**30,791**	32,48	**4,9788**
2,2	3,801 3	**33,794**	29,59	**4,5357**
2,3	4,154 8	**36,936**	27,07	**4,1498**
2,4	4,523 9	**40,217**	24,87	**3,8112**

II. — RÉSISTANCE ET POIDS DES FILS DE CUIVRE NUS *(suite)*

DIAMÈTRES EN MILLIMÈTRES	SECTIONS EN MILLIMÈTRES CARRÉS	POIDS EN GRAMMES PAR MÈTRE	LONGUEURS EN MÈTRES PAR KILOGRAMME	RÉSISTANCES EN OHMS PAR KILOMÈTRE
2,5	4,908 7	43,638	22,92	3,512 4
2,6	5.309 3	47,199	21,19	3,247 4
2,7	5,725 6	50,900	19,65	3,011 3
2,8	6,157 5	54,739	18,27	2,800 1
2,9	6,605 2	58,719	17.11	2,610 2
3	7,068 6	62,840	15,91	2,439 2
3,1	7,547 7	67,099	14,90	2,285 3
3,2	8,042 5	71,498	13,99	2,143 7
3,3	8,553 0	76,036	13,15	2,015 8
3,4	9,079 2	80,714	12,39	1,899 0
3,5	9,621 1	85,531	11,69	1.792 1
3,6	10,178 3	90,489	11,05	1,693 8
3,7	10,752 1	95,585	10,46	1,603 5
3,8	11,341 2	100,82	9,919	1,520 3
3,9	11,945 9	106,20	9,416	1,443 3
4	12,566 4	111,76	8,948	1,372 0
4,1	13,202	117,41	8,517	1,305 9
4,2	13,854	123,21	8,116	1,244 5
4,3	14,522	129,14	7,744	1,187 2
4,4	15,205	135,22	7,395	1,133 9
4,5	15,904	141,43	7,071	1,084 1
4,6	16,619	147,78	6,762	1,037 5
4,7	17,349	154,28	6,482	0,993 8
4,8	18,095	160,91	6,215	0,952 8
4,9	18,857	167,70	5,963	0,914 3
5	19,635	174,60	5,727	0,878 1

III. — COURANTS MAXIMUMS ADMISSIBLES EN SERVICE CONTINU DANS DES CONDUCTEURS RIGIDES EN CUIVRE, ISOLÉS AU CAOUTCHOUC, 750 T et RT

CONSTITUTION DES CONDUCTEURS	SECTION EN mm^2	RÉSISTANCE EN OHMS PAR KILOMÈTRE	COURANTS MAXIMUMS ADMISSIBLES EN AMPÈRES			INTENSITÉ NOMINALE MAXIMUM DES FUSIBLES
			1 conducteur par rainure sous moulure ou 1 conducteur sous tube	2 conducteurs sous tube	3 conducteurs sous tube	
fil 12/10	1,13	15,24	13	11	9	6
16/10	2,01	8,57	19	16,5	13,5	10
20/10	3,14	5,49	25	22	18	15
25/10	4,91	3,51	33	29	24	20
câble 7 fils 10/10	5,50	3,10	36	31	26	25
7 » 12/10	7,92	2,31	45	39	32,5	30
7 » 14/10	10,8	1,69	55	47	39,5	40
7 » 16/10	14,1	1,21	65	56	45,5	50
7 » 18/10	17,8	0,96	74	63	53	
7 » 20/10	21.5	0,80	83	71	59	
19 » 14/10	29,3	0,59	101	85	71	
19 » 16/10	38	0,45	119	100	83,5	

Les intensités maximums indiquées sont admissibles quand la température ambiante ne dépasse pas 30°. La limite de l'échauffement est 30°.

IV. — FLUX LUMINEUX DES LAMPES NEUVES A FILAMENT DE TUNGSTÈNE EN ATMOSPHÈRE GAZEUSE (valeurs minimums)

WATTS	LUMENS.		WATTS	LUMENS.	
	110 volts	220 volts		110 volts	220 volts
25	210	184	**200**	2 650	2 390
40	376	315	**300**	4 320	3 890
60	647	513	**500**	7 640	6 900
75	859	718	**750**	11 900	10 700
100	1 190	1 020	**1 000**	16 500	14 900
150	1 900	1 660	**1 500**	26 000	23 700

V. — TARIFS DE FOURNITURE EN HAUTE TENSION

(Seine et Seine-et-Oise au 1-1-60).

Tension : 15 000 *volts*

TARIFS	PRIME FIXE PAR kW	PRIX D'ÉNERGIE EN NF/kWh				
		HIVER			ÉTÉ	
		P	HP	HC	HP	HC
Tarif d'appoint	93,23 F	0,1177	0,0695	0,0315	0,0461	0,027
Tarif général	49,92	0,1569	0,0869	0,0348	0,0512	0,0298
Tarif pour courtes utilisations	12,48	0,3138	0,1442	0,0348	0,0639	0,0298
Tarif de secours	12,48	0,3138	0,1564	0,0348	0,0921	0,0298
Énergie réactive { Facturation / Bonification		0,0109 / 0,0044 F/kVarh			0,0064 / 0,0025	

VI. — RAPPORTS TRIGONOMÉTRIQUES (division en degrés)

o	′	SINUS	COSINUS	TANGENTE	o	′	SINUS	COSINUS	TANGENTE
0	0	0,000	1,000	0,000					
	30	009	000	009					
1	0	017	000	017	23	30	399	917	435
	30	026	1,000	026	24	0	407	914	445
2	0	035	0,999	035		30	415	910	456
	30	044	999	044	25	0	423	906	466
3	0	052	999	052		30	431	903	477
	30	061	998	061					
4	0	070	998	070	26	0	0,438	0,899	0,488
	30	078	997	079		30	446	895	499
5	0	087	996	087	27	0	454	891	510
	30	096	995	096		30	462	887	521
					28	0	469	883	532
6	0	0,105	0,995	0,105		30	477	879	543
	30	113	994	114	29	0	485	875	564
7	0	122	993	123		30	492	870	556
	30	131	991	132	30	0	500	866	577
8	0	139	990	141		30	508	862	589
	30	148	989	149					
9	0	156	988	158	31	0	0,515	0,857	0,601
	30	165	986	167		30	522	853	613
10	0	174	985	176	32	0	530	848	625
	30	182	983	185		30	537	843	637
					33	0	545	839	649
11	0	0,191	0,982	0,194		30	552	834	662
	30	199	980	203	34	0	559	829	675
12	0	208	978	213		30	566	824	687
	30	216	976	222	35	0	574	819	700
13	0	225	974	231		30	581	814	713
	30	233	972	240					
14	0	242	970	249	36	0	0,588	0,809	0,727
	30	250	968	259		30	595	804	740
15	0	259	966	268	37	0	602	799	754
	30	267	964	277		30	609	793	767
					38	0	616	788	781
16	0	0,276	0,961	0,287		30	623	783	795
	30	284	959	296	39	0	629	777	810
17	0	292	956	306		30	636	772	824
	30	301	954	315	40	0	643	766	839
18	0	309	951	325		30	649	760	854
	30	317	948	335					
19	0	326	946	344	41	0	0,656	0,755	0,869
	30	334	943	354		30	663	749	885
20	0	342	940	364	42	0	669	743	900
	30	350	937	374		30	676	737	916
					43	0	682	731	933
21	0	0,358	0,934	0,384		30	688	725	949
	30	367	930	394	44	0	695	719	966
22	0	375	927	404		30	701	713	983
	30	383	924	414	45	0	707	707	1,000
23	0	391	921	424		30	713	701	1,018

VI. — RAPPORTS TRIGONOMÉTRIQUES (division en degrés)

(suite)

o	'	SINUS	COSINUS	TANGENTE	o	'	SINUS	COSINUS	TANGENTE
46	0	0,719	0,695	1,036	68	30	930	367	539
	30	725	638	054	69	0	934	358	605
47	0	731	682	072		30	937	350	675
	30	737	676	091	70	0	940	342	747
48	0	743	669	111		30	943	334	824
	30	749	663	130					
49	0	755	656	150	71	0	0,946	0,326	2,904
	30	760	649	171		30	948	317	2,989
50	0	766	643	192	72	0	951	309	3,078
	30	772	636	213		30	954	301	172
					73	0	956	292	271
51	0	0,777	0,629	1,235		30	959	284	376
	30	783	623	257	74	0	961	276	487
52	0	788	616	280		30	964	267	606
	30	793	609	303	75	0	966	259	3,732
53	0	799	602	327		30	968	250	3,867
	30	804	595	351					
54	0	809	588	376	76	0	0,970	0,242	4,011
	30	814	581	402		30	972	233	4,165
55	0	819	574	428	77	0	974	225	4,331
	30	824	566	455		30	976	216	4,511
					78	0	978	208	4,705
56	0	0,829	0,559	1,483		30	980	199	4,915
	30	834	552	511	79	0	982	191	5,145
57	0	839	545	540		30	983	182	5,395
	30	843	537	570	80	0	985	174	5,671
58	0	848	530	600		30	986	165	5,976
	30	853	522	632					
59	0	857	515	664	81	0	0,988	0,156	6,314
	30	862	508	698		30	989	148	6,691
60	0	866	500	1,732	82	0	990	139	7,115
	30	870	492	767		30	991	131	7,596
					83	0	993	122	8,144
61	0	0,875	0,485	1,804		30	994	113	8,777
	30	879	477	842	84	0	995	105	9,514
62	0	883	469	881		30	995	096	10,385
	30	887	462	921	85	0	996	087	11,430
63	0	891	453	1,963		30	997	078	12,706
	30	895	446	2,006					
64	0	899	438	2,050	86	0	0,998	0,070	14,301
	30	903	431	097		30	998	061	16,350
65	0	906	423	145	87	0	999	052	19,081
	30	910	415	194		30	999	044	22,904
					88	0	999	035	28,636
66	0	0,914	0,407	2,246		30	1,000	026	38,188
	30	917	399	300	89	0	1,000	017	57,290
67	0	921	391	356		30	1,000	009	114,589
	30	924	383	414	90	0	1,000	0,000	∞
68	0	927	375	475					

TABLE DES MATIÈRES

Pages

Programme d'électrotechnique du CAP de monteur-électricien..... 4

PREMIÈRE PARTIE

COURANT CONTINU

1. — Propriétés du courant continu.

1re Leçon. — Les principaux effets du courant électrique. Sens d'un courant..... 8
2e Leçon. — Intensité d'un courant. Ampère..... 19
3e Leçon. — Mesure de l'intensité d'un courant : ampèremètres. Quantité d'électricité : ampèreheure..... 26
4e Leçon. — Résistance électrique. Ohm..... 35
5e Leçon. — Résistance d'un fil..... 43
6e Leçon. — Tension électrique. Volt..... 51
7e Leçon. — Couplage des résistances. Force électromotrice..... 57

2. — Piles et accumulateurs.

8e Leçon. — Actions chimiques d'un courant continu. Électrolyse..... 69
9e Leçon. — Piles électriques..... 80
10e Leçon. — Élément d'accumulateur au plomb..... 91
11e Leçon. — Batteries d'accumulateurs..... 101

3. — Chauffage électrique. Éclairage par incandescence.

12e Leçon. — Dégagement de chaleur dans un conducteur parcouru par un courant..... 110
13e Leçon. — Travail et puissance. Énergie..... 117
14e Leçon. — Énergie et puissance électriques. Rendement industriel d'une machine..... 125
15e Leçon. — Applications de l'effet Joule. Chauffage électrique..... 133
16e Leçon. — Éclairage électrique par incandescence..... 144
17e Leçon. — Éclairage par incandescence (*suite*). Installations d'éclairage..... 154
18e Leçon. — Dangers du courant électrique..... 168

4. — Aimants. Électroaimants. Sonneries électriques.

Pages.

19e Leçon. — Aimants. Electroaimants..... 175
20e Leçon. — Applications des électroaimants. Sonneries électriques... 184
21e Leçon. — Flux magnétique..... 194
22e Leçon. — Aimantation des métaux ferreux. Circuit magnétique..... 203

5. — Induction électromagnétique.

23e Leçon. — Courants induits..... 213
24e Leçon. — Courants de Foucault. Self-induction..... 224

6. — Dynamos génératrices.

25e Leçon. — Dynamo à excitation indépendante..... 233
26e Leçon. — Différents modes d'excitation des dynamos..... 248
27e Leçon. — Dynamos multipolaires..... 259

7. — Moteurs à courant continu.

28e Leçon. — Moteur à excitation indépendante..... 267
29e Leçon. — Les moteurs shunt, série et compound..... 279
30e Leçon. — Rendement et couplage des machines à courant continu. 290

DEUXIÈME PARTIE

COURANT ALTERNATIF

8. — Quelques propriétés du courant alternatif.

31e Leçon. — Comparaison expérimentale du courant alternatif et du courant continu..... 302
32e Leçon. — Représentations des courants et des tensions sinusoïdaux .. 312
33e Leçon. — Intensité efficace d'un courant alternatif..... 323
34e Leçon. — Circuit parcouru par un courant alternatif..... 335
35e Leçon. — Circuit parcouru par un courant alternatif (*suite*)..... 346
36e Leçon. — Importance du facteur de puissance d'une installation.... 359

9. — Alternateurs et transformateurs.

37e Leçon. — Alternateurs..... 366
38e Leçon. — Courants polyphasés..... 378
39e Leçon. — Transformateurs monophasés..... 392
40e Leçon. — Transformateurs triphasés. Autotransformateurs..... 401
41e Leçon. — Transport et distribution de l'énergie électrique..... 411

10. — Moteurs à courants alternatifs.

42e Leçon. — Moteurs asynchrones triphasés..... 424

Pages.
43e Leçon. — Moteurs asynchrones triphasés (*suite*)..... 440
44e Leçon. — Moteurs monophasés. Moteurs synchrones..... 451
45e Leçon. — Transformation de courants alternatifs en courant continu... 459

TROISIÈME PARTIE

COMPLÉMENTS

46e Leçon. — Mesure des principales grandeurs électriques (intensité d'un courant, tension électrique)..... 468
47e Leçon. — Mesure des principales grandeurs électriques (résistance électrique, puissance d'un récepteur et d'un générateur). 473
48e Leçon. — Compteurs électriques. Tarification de l'énergie électrique. 482
49e Leçon. — Arc électrique. Tubes fluorescents..... 490
50e Leçon. — Téléphones privés..... 500
51e Leçon. — Paratonnerres..... 506
TABLEAU I. — Principaux symboles graphiques..... 510
— II. — Résistance et poids des fils de cuivre nus..... 512
— III. — Caractéristiques des conducteurs usuels..... 514
— IV. — Flux lumineux des lampes à incandescence..... 515
— **V. — Tarifs haute tension** **516**
— VI. — **Rapports trigonométriques**..... **517**

Imprimé en France par Brodard-Taupin, Imprimeur-Relieur, Coulommiers-Paris.
62512-IV-12-1964. Dépôt légal n° 3083. 1er trimestre 1965.

LIBRAIRIE DELAGRAVE
15, Rue Soufflot - PARIS (V^e)

R. CLUZEL et H. COURT

● **ARITHMÉTIQUE. - Initiation à l'algèbre**

A l'usage des Lycées et Collèges (5e, 4e et 3e) et des candidats aux concours administratifs.

R. CLUZEL et H. COURT

● **ALGÈBRE**

R. CLUZEL et J.-P. ROBERT

● **LA GÉOMÉTRIE ET SES APPLICATIONS**

R. BASQUIN

● **MÉCANIQUE EXPÉRIMENTALE.** Deux volumes.

R. BASQUIN et A. MÉTRAL

● **MÉCANIQUE PREMIERE PARTIE**

R. BASQUIN

● **MÉCANIQUE DEUXIEME PARTIE**

Exercices de révision (problèmes donnés aux examens).

Imprimé en France - DELAGRAVE - PARIS (12-64)